



Hugo Filipe Entradas Silva

Licenciado

Avaliação do Clima Interior de uma Igreja em Lisboa

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil Construção

Orientador: Doutor Fernando M. A. Henriques, Professor Catedrático, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Profª. Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues

Arguente: Prof. Doutor Daniel Aelenei

Vogal: Prof. Doutor Fernando M. A. Henriques



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Junho, 2012

Avaliação do Clima Interior de uma Igreja em Lisboa

Copyright © Hugo Filipe Entradas Silva, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Professor Doutor Fernando Henriques por me ter possibilitado a realização deste trabalho e pela sua orientação e ajuda ao longo deste processo. Foi sem dúvida uma experiência bastante gratificante, trabalhar sob orientação de uma pessoa que tanto admiro e que mantém um culto pelo rigor e excelência, algo que deveria estar presente em todos nós. Teve sempre um conselho para me dar ou uma palavra de conforto quando me sentia um pouco perdido, obrigando-me a pensar e reflectir, mostrando-me realmente o que é a investigação.

Gostaria também de agradecer à paróquia de São Cristóvão, especialmente ao Padre Edgar Clara, por me possibilitar a realização deste estudo, mostrando sempre prontidão, boa vontade e simpatia em me receber e ajudar no processo de instrumentação da Igreja e recolha de dados. Tenho também de agradecer ao senhor Luís Nobre, que tantas vezes me recebeu e acompanhou às instalações da Igreja, depositando sempre grande confiança em mim e no estudo desenvolvido.

Quero também deixar um agradecimento muito especial ao engenheiro Vítor Silva, por toda a disponibilidade, boa vontade, capacidade para resolver problemas e amizade que demonstrou, tendo sido uma ajuda fulcral para a instalação de todo o sistema de monitorização.

Tenho de fazer um agradecimento especial ao colega e grande amigo João Simões, que me acompanhou ao longo deste percurso. Partilhámos muitos momentos de trabalho árduo, mas os bons momentos não ocorreram em menor número, tendo tido um grande contributo tanto anímico como técnico para a elaboração deste trabalho, com conselhos importantes e ajuda em alguns pontos e também pela revisão final que me ajudou a fazer. Agradeço ainda aos amigos Daniel e João Campos, pela ajuda que me deram na revisão final do trabalho.

Não posso esquecer os amigos e colegas que me acompanharam ao longo do curso e me possibilitaram o equilíbrio necessário para concluir esta importante etapa. Não poderei citar todos, pois foram inúmeras as pessoas que contribuíram para tal, mas queria deixar um agradecimento especial ao Daniel, à Marta e ao José, pelos bons momentos que passámos e pela forte amizade que construímos e decerto perdurará.

Quero deixar também uma palavra aos amigos de infância, que apesar da distância e dos diferentes rumos que seguimos continuaram sempre a demonstrar a sua grande amizade e prontidão. Um agradecimento também para os colegas e amigos de secundário e que acompanharam a minha vinda para Lisboa, facilitando a adaptação e mostrando sempre grande amizade e companheirismo. Não sinto a necessidade de citar nomes, pois eles sabem bem quem são e o valor que lhes dou.

Agradeço ainda ao grupo académico GANK, onde conheci pessoas novas de diferentes cursos e onde pude viver bons momentos de descontração na companhia de bons amigos.

Para o fim deixo as pessoas mais importantes, a minha família. Quero fazer um agradecimento especial aos meus pais e irmão que sempre me apoiaram nos bons e maus momentos e possibilitaram este caminho. Nunca me questionaram pelas opções e caminhos que pretendi seguir, incentivando-me sempre, mesmo quando as opções tomadas pareciam arriscadas, dando sempre provas de confiança no meu valor e na qualidade das minhas escolhas. Muito do que sou devo a eles, pois passaram-me muitos dos valores que julgo necessários para vingar na vida.

Resumo

Muitas vezes os edifícios antigos, principalmente os de relevo histórico, apresentam microclimas próprios, nem sempre correspondentes às condições ideais para a correcta conservação dos materiais e artefactos. Os materiais adaptam-se e respondem às alterações por que passam com falhas e deformações, muitas vezes irreversíveis, pelo que novas alterações, principalmente se muito acentuadas, podem levar à sua deterioração. Assim, é importante conhecer o microclima passado e actual, com especial atenção para os ciclos de temperatura e humidade relativa, antes de se proceder a qualquer alteração do microclima existente.

Neste estudo pretendeu-se caracterizar a evolução do clima interior de um edifício histórico de elevada inércia térmica, a Igreja de São Cristóvão, em Lisboa, com a medição de temperaturas e humidades relativas do ar e temperaturas de uma superfície. Estas medições foram efectuadas de forma automática, com a distribuição de vinte e cinco sensores no interior, um na torre norte e outro no desvão da cobertura. Pretendeu-se obter uma amostragem significativa da distribuição de temperaturas e humidades relativas em planta e a diferentes alturas, a sua relação com as condições exteriores, assim como a monitorização das condições superficiais de uma parede orientada a norte. As medições ocorreram entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012, com registos a cada 10 minutos. Efectuaram-se também medições manuais a quatro alturas distintas de um total de trinta e quatro pontos em planta, o que permitiu a elaboração posterior de mapas tridimensionais e de isolinhas.

Observou-se a existência de um microclima interior muito estável, com pequenos ciclos diários de temperatura e humidade relativa, onde o fluxo de visitantes constitui o principal factor de influência para as variações ocorridas, com as condições exteriores a exercerem uma influência reduzida. Foi também possível confirmar a importância da inércia térmica que provoca o atraso sazonal, com as temperaturas interiores a serem superiores às exteriores no período de Outono/Inverno e o inverso para a Primavera. Constatou-se a ausência de condensações superficiais ao longo de todo o período de monitorização. Quanto à distribuição do ar, foi possível observar a presença de correntes convectivas de 11 de Novembro de 2011 a 7 de Março de 2012, denotando-se a partir desta data a estratificação do ar por temperaturas.

Palavras-chave: Microclima, temperatura, humidade relativa, inércia térmica, Igreja, campanha experimental

Abstract

In order to describe the interior climate evolution of a historical building with high thermal inertia – the Church of São Cristóvão, in Lisbon – measurements of the temperature and relative humidity of the air and the interior surface temperature of the north façade were made.

These measurements were made automatically, with an array of sensors in the building's interior. The goal was to get a relevant sampling of the temperature and relative humidity in the horizontal plan and at different heights, as well as these parameters' variations on a surface level, both in the floor and in the wall.

It was therefore possible to study the stratification of temperatures and the thermal delay compared with the external temperatures, as well as the probability of surface condensations on the facade with lower solar exposition. Manual measurements were also made in order to more thoroughly describe and map the temperature and relative humidity both in the horizontal and in the vertical plan.

Measurements were made between November 11th, 2011, and April 30th, 2012.

In a building without mechanical climatization systems, the visitor's flow and the activation of the illumination systems during the church's opening hours are the main factors that influence the variations of the parameters in study. A significant thermal delay compared with to the external temperatures due to the high thermal inertia of the building, was observed. It was also observed the existence of a very stable interior microclimate, with low cycles of temperature and relative humidity.

These issues, and possible approaches, are discussed in this work.

Keywords: Microclimate, temperature, relative humidity, thermal inertia, cultural heritage, experimental monitoring

Índice

1. Introdução	1
1.1. Motivação e enquadramento do tema	1
1.2. Objectivos e metodologia	2
1.3. Estrutura do trabalho.....	2
2. Processos de transferência de calor e inércia térmica	5
2.1. Condução	5
2.2. Inércia térmica	9
2.3. Convecção	13
2.3.1. Convecção natural	14
2.4. Radiação.....	14
2.4.1. Comportamento dos corpos face às suas características.....	16
2.5. Outros parâmetros importantes para as trocas de calor	18
3. Microclima, temperatura e humidade.....	21
3.1. Microclima	21
3.2. Temperatura	21
3.2.1. A temperatura nos edifícios	22
3.3. Humidade.....	23
3.3.1. Pressão parcial de vapor de água	24
3.3.2. Relação entre a mistura de ar seco e vapor de água	25
3.3.3. Concentração de vapor de água	26
3.3.4. Humidade absoluta.....	27
3.3.5. Humidade relativa	28
3.3.6. Temperatura do ponto de orvalho	30

3.3.7.	Condensações superficiais.....	31
3.3.8.	Representação gráfica	32
3.4.	Adsorção	33
4.	Processos de degradação associados à temperatura e humidade.....	35
4.1.	Mecanismos de degradação por temperatura	35
4.2.	Mecanismos de degradação por humidade	36
4.3.	Condições ideais para a conservação	38
5.	Metodologia	41
5.1.	Descrição do edifício	41
5.2.	Definição geral do clima em Lisboa	44
5.3.	Equipamentos utilizados.....	48
5.3.1.	Data logger ΔT DL2e	48
5.3.1.1.	Termopares.....	50
5.3.1.2.	Sonda de temperatura e humidade relativa RHT2nl	51
5.3.2.	Hobo U12-13.....	52
5.3.3.	Rotronic HygroLog HL-NT2	52
5.3.4.	Psicrómetro de roca	53
5.3.5.	Aparelho de medição de temperaturas superficiais	54
5.4.	Procedimento experimental	54
5.4.1.	Monitorização automática do clima interior e exterior da Igreja	54
5.4.1.1.	Resumo das medições automáticas.....	58
5.4.1.2.	Tratamento dos dados.....	59
5.4.2.	Monitorização manual e tratamento de dados.....	60
6.	Apresentação e análise de resultados	63
6.1.	Resultados globais	63
6.2.	Resultados por estação do ano.....	72

6.2.1. Outono.....	72
6.2.2. Inverno.....	76
6.2.3. Primavera.....	80
6.3. Amplitudes diárias de temperatura e humidade relativa.....	83
6.4. Medições manuais	85
6.4.1. Inverno - 8 de Março de 2012	85
6.4.2. Primavera - 3 de Maio de 2012	91
7. Conclusões.....	97
7.1. Principais conclusões	97
7.2. Desenvolvimentos futuros.....	98
Bibliografia	99

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Valores de amortecimento e atraso para soluções construtivas correntes [26]	12
Tabela 2.2 – Coeficientes de absorção da radiação solar α e emissividade a baixa temperatura ϵ de materiais de construção correntes [26]	17
Tabela 2.3 – Resistências térmicas superficiais convencionais [58]	19
Tabela 5.1 – Sensores instalados na 1ª fase.....	56
Tabela 5.2 - Sensores instalados na 2ª fase	56
Tabela 5.3 - Sensores instalados na 3ª fase	57
Tabela 5.4 – Comparação entre vários métodos de interpolação [50].....	62
Tabela 6.1 – Temperaturas máximas e mínimas observadas no exterior, interior da Igreja e desvão da cobertura no período compreendido entre 4 e 10 de Dezembro de 2011 - Outono	73
Tabela 6.2 – Temperaturas máximas e mínimas observadas no exterior, no interior da Igreja e no desvão da cobertura no período compreendido entre 19 e 25 de Fevereiro de 2012 - Inverno	77
Tabela 6.3 – Temperaturas máximas e mínimas observadas no exterior, interior da Igreja e desvão da cobertura no período compreendido entre 22 e 28 de Abril de 2012 - Primavera	81

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Volume elementar $dx.dy.dz$ [26]	6
Figura 2.2 - Conceito de Inércia Térmica [26]	11
Figura 2.3 – Convecção natural-camadas limite [26]	14
Figura 2.4 – Factores de forma de uma superfície em relação a si própria [26].....	17
Figura 3.1 – Pressão de Saturação ($P_{v,sat}$) do vapor de água (linha mais grossa) e a pressão (P_v) do vapor de água para diferentes valores de humidade relativa. A linha mais grossa equivale a uma humidade relativa (H_r) de 100%. Escala linear [7]	24
Figura 3.2 – Diagrama Psicométrico [26]	32
Figura 3.3 – Exemplo de histerese em materiais de origem mineral [19]	33
Figura 3.4 – Histerese negligenciável (rocha calcária) [19]	34
Figura 5.1 – Localização da Igreja de São Cristóvão [fonte: Google Maps – Novembro de 2011]	41
Figura 5.2 – Planta da Igreja de São Cristóvão (sem escala) [55]	42
Figura 5.3 – Corte longitudinal de Igreja de São Cristóvão (sem escala) [55]	43
Figura 5.4 – Igreja de São Cristóvão, 1944 [20]	43
Figura 5.5 – Interior da Igreja de São Cristóvão	44
Figura 5.6 - Evolução das temperaturas mensais segundo a normal climatológica de 1971-2000 [1].	45
Figura 5.7 - Evolução da precipitação mensal segundo a normal climatológica de 1971-2000 [1]	45
Figura 5.8 – Temperaturas e humidades relativas segundo a normal climatológica de 1951-1980 [26]	46
Figura 5.9 – Evolução das temperaturas máximas e mínimas de Novembro a Abril nos últimos três anos e comparação com a normal climatológica de 1971-2000 – Lisboa [31-48]	47
Figura 5.10 - Evolução da precipitação de Novembro a Abril nos últimos três anos e comparação com a normal de 1971-2000 – Lisboa [31-48]	48
Figura 5.11 – <i>Data logger</i> DL2e da marca Delta T	49
Figura 5.12 – Programa de edição do <i>data logger</i> DL2e – <i>DL2 Program Editor</i>	49
Figura 5.13 – Programação e definições básicas do <i>data logger</i> DL2e – <i>DL2 Control Panel</i>	50

Figura 5.14 – Bobine de termopar tipo T	50
Figura 5.15 – Esquema de obtenção da temperatura T1 no ponto 1 pelo diferencial de potencial eléctrico medido no aparelho em T2 [67]	51
Figura 5.16 – Sonda de temperatura e humidade relativa da ΔT [65]	51
Figura 5.17 – Aparelho portátil de medição de temperatura e humidade relativa <i>Hobo U12-13</i>	52
Figura 5.18 - Aparelho portátil de medição de temperatura e humidade relativa <i>HydroLog HL-NT2</i> .	53
Figura 5.19 – Psicrómetro de roca	53
Figura 5.20 – Termómetro digital para medir temperaturas superficiais	54
Figura 5.21 – Disposição dos sensores em planta, com a cor rosa a representar a 1ª fase, a azul a 2ª fase a a verde a 3ª fase [55]	57
Figura 5.22 - Disposição dos sensores em corte longitudinal, com a cor rosa a representar a 1ª fase, a azul a 2ª fase a a verde a 3ª fase [55]	58
Figura 5.23 – Disposição geral dos termopares na nave principal da Igreja	59
Figura 5.24 – Aparelho de monitorização das condições exteriores e sua protecção	59
Figura 5.25 – Planta dos pontos de leitura para a caracterização do microclima interior da Igreja [55]	61
Figura 5.26 – Exemplificação das medições feitas em altura	62
Figura 5.27 – Balão com o sensor acoplado e garrafa de hélio	62
Figura 6.1 – Evolução da temperatura no exterior e interior da Igreja e no desvão da cobertura no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012	64
Figura 6.2 - Evolução da humidade relativa no exterior e interior da Igreja e no desvão da cobertura no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012	65
Figura 6.3 – Evolução da temperatura na zona central da nave da Igreja, na sacristia situada a norte e na casa mortuária a sul no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012	66
Figura 6.4 - Evolução da humidade relativa na zona central da nave da Igreja, na sacristia situada a norte e na casa mortuária a sul num período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012	66
Figura 6.5 – Evolução da temperatura e humidade relativa numa coluna vertical colocada junto ao púlpito norte no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012	68

Figura 6.6 - Evolução da temperatura e humidade relativa na transversal que une os dois púlpitos no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012	69
Figura 6.7 - Evolução da temperatura e humidade relativa na longitudinal da nave principal no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012	70
Figura 6.8 - Evolução da temperatura e humidade relativa do ar e superficial no período compreendido entre 11 e Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012.....	71
Figura 6.9 - Evolução da temperatura no exterior, interior da Igreja e desvão da cobertura no período compreendido entre 4 e 10 de Dezembro de 2011 – Outono	73
Figura 6.10 - Evolução da humidade relativa no exterior, interior da Igreja e desvão da cobertura no período compreendido entre 4 e 10 de Dezembro de 2011 - Outono	74
Figura 6.11 - Evolução da temperatura e humidade relativa numa coluna vertical colocada junto ao púlpito norte no período compreendido entre 4 e 10 de Dezembro de 2011 - Outono	75
Figura 6.12 - Evolução da temperatura e humidade relativa do ar e superficial no período compreendido entre 4 e 10 de Dezembro de 2011 – Outono	75
Figura 6.13 - Evolução da temperatura no exterior, interior da Igreja e desvão da cobertura no período compreendido entre 19 e 25 de Fevereiro de 2012 – Inverno	77
Figura 6.14 - Evolução da humidade relativa no exterior, interior da Igreja e desvão da cobertura no período compreendido entre 19 e 25 de Fevereiro de 2012 - Inverno.....	78
Figura 6.15 - Evolução da temperatura e humidade relativa numa coluna vertical colocada junto ao púlpito norte no período compreendido entre 19 e 25 de Fevereiro de 2012 - Inverno	79
Figura 6.16 - Evolução da temperatura e humidade relativa do ar e superficial no período compreendido entre 19 e 25 de Fevereiro de 2012 - Inverno	79
Figura 6.17 - Evolução da temperatura no exterior, interior da Igreja e desvão da cobertura no período compreendido entre 22 e 28 de Abril de 2012 – Primavera.....	81
Figura 6.18 - Evolução da humidade relativa no exterior, interior da Igreja e desvão da cobertura no período compreendido entre 22 e 28 de Abril de 2012- Primavera	82
Figura 6.19 - Evolução da temperatura e humidade relativa numa coluna vertical colocada junto ao púlpito norte no período compreendido entre 22 e 28 de Abril de 2012 - Primavera	83
Figura 6.20 - Evolução da temperatura e humidade relativa do ar e superficial no período compreendido entre 22 e 28 de Abril de 2012 – Primavera	83
Figura 6.21 - Amplitude para os ciclos diários de temperatura no interior da Igreja no periodo compreendido entre 12 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012	84

Figura 6.22 - Amplitude para os ciclos diários de humidade relativa no interior da Igreja no período compreendido entre 12 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012	85
Figura 6.23 - Mapeamento horizontal das temperaturas a uma altura de 2,85 m no dia 8 de Março de 2012	87
Figura 6.24 - Mapeamento horizontal das humidades relativas a uma altura de 2,85 m no dia 8 de Março de 2012	88
Figura 6.25 - Representação tridimensional da temperatura num plano horizontal a uma altura de 2,85 m para o dia 8 de Março de 2012	89
Figura 6.26 - Representação tridimensional da humidade relativa num plano horizontal a uma altura de 2.85 metros para o dia 8 de Março de 2012	89
Figura 6.27 - Mapeamento vertical das temperaturas num plano a passar pelo centro da Igreja no dia 8 de Março de 2012	90
Figura 6.28 - Mapeamento vertical das humidades relativas num plano a passar pelo centro da Igreja no dia 8 de Março de 2012	91
Figura 6.29 - Mapeamento horizontal das temperaturas a uma altura de 2,85 m no dia 3 de Maio de 2012	93
Figura 6.30 - Mapeamento horizontal das humidades relativas a uma altura de 2,85 m no dia 3 de Maio de 2012	94
Figura 6.31 - Representação tridimensional da temperatura num plano horizontal a uma altura de 2,85 m para o dia 3 de Maio de 2012	95
Figura 6.32 - Representação tridimensional da humidade relativa num plano horizontal a uma altura de 2,85 m para o dia 3 de Maio de 2012	95
Figura 6.33 - Mapeamento vertical das temperaturas num plano a passar pelo centro da Igreja no dia 3 de Maio de 2012	96
Figura 6.34 - Mapeamento vertical das humidades relativas num plano a passar pelo centro da Igreja no dia 3 de Maio de 2012	96

Simbologia

A	área (m^2)
a	difusidade térmica (m^2/s)
c_p	calor específico a pressão constante ($\text{J}/\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}$)
c	velocidade da luz (m/s)
d	espessura do elemento (m)
E	energia cinética (J)
e	quantidade de energia dos fótons (W)
\dot{E}_g	quantidade de energia gerada (W)
\dot{E}_{in}	quantidade de energia transferida para um volume (W)
\dot{E}_{out}	quantidade de energia transferida de um volume (W)
\dot{E}_{st}	quantidade de energia armazenada num volume (W)
F_{ij}	factor de forma da superfície i para a superfície j (adim.)
f	frequência (Hz)
H_r	humidade relativa (%)
h	condutância térmica ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)
$h -$	constante de Planck ($6,625 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)
h_c	condutância térmica superficial por convecção ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)
h_i	condutância térmica superficial interior ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)
h_e	condutância térmica superficial exterior ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)
$1/h_i$	resistência térmica superficial interior ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$)
$1/h_e$	resistência térmica superficial exterior ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$)
k	constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J}/\text{K}$)
m_a	massa de ar seco (Kg)
m_v	massa de vapor de água (Kg)
P_a	pressão parcial de ar seco (Pa)
P_v	pressão parcial de vapor de água (Pa)
$P_{v,sat}$	pressão de saturação de vapor de água (Pa)

Q	quantidade de calor (W)
Q_{max}	valor máximo da energia emitida por um corpo (W)
q	fluxo de calor (W/m^2)
q'	quantidade de energia gerada por unidade de volume (W/m^3)
R	constante universal dos gases ($8,3169 \times 10^7 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
T	temperatura absoluta (K)
t	temperatura em graus centígrados ($^{\circ}\text{C}$)
t	tempo (s)
t_s	temperatura de ponto de orvalho ($^{\circ}\text{C}$)
t_{si}	temperatura superficial interior ($^{\circ}\text{C}$)
t_{se}	temperatura superficial exterior ($^{\circ}\text{C}$)
U	coeficiente de transmissão térmica ($W/m^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)
V	volume (m^3)
v	concentração de vapor de água no ar (Kg/m^3)
x_{ar}	humidade absoluta (Kg/Kg)
w	proporção da mistura de ar húmido (Kg/Kg)
α	coeficiente de absorção
ε	emissividade
λ	condutibilidade térmica do material seco ($W/m \cdot ^{\circ}\text{C}$)
λ	comprimento de onda (μm)
μ	factor de amortecimento
ρ	coeficiente de reflexão ou reflectividade
ρ	massa volúmica (kg/m^3)
ρ	pressão atmosférica (Pa)
σ	constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/m^2 \cdot \text{K}^4$)
τ	coeficiente de transmissão ou transmissividade
φ	factor de atraso

1. Introdução

1.1. Motivação e enquadramento do tema

Desde os primórdios da existência humana que o Homem sentiu a necessidade de construir abrigos para se poder proteger das adversas condições atmosféricas que se verificavam em determinadas ocasiões.

Estes primeiros abrigos eram simples e construídos com matérias-primas existentes nas proximidades, como o barro ou a madeira, por exemplo. Com o passar do tempo começou-se a sentir a necessidade de evoluir as construções, passando de simples abrigos para pequenas casas, aproximando-se mais um pouco da construção que conhecemos actualmente. Com esta evolução, começou-se a verificar a construção de habitações em pequenos aglomerados populacionais, aumentando o convívio e trocas entre os povos, possibilitando uma evolução também a nível dos materiais, e com o início da utilização de tijolos de terra crua e adobe, entre outras soluções.

Com o passar do tempo o Homem deixou de procurar apenas abrigo, e passou a preocupar-se com questões de conforto, ligadas essencialmente com questões higrotérmicas, como a temperatura e a humidade relativa. Evoluiu-se assim, principalmente nas catedrais e nos edifícios importantes, para a construção em pedra com paredes espessas, contribuindo para uma elevada inércia térmica e aumentando o conforto térmico.

O clima local era cuidadosamente estudado de forma a construir edifícios que se adaptassem, criando-se um microclima natural. Construíam-se os edifícios respeitando a orientação solar, a predominância do vento e da precipitação, com a sua implantação a ser função da temperatura e quantidade de luz pretendida.

Actualmente, com o desenvolvimento de novas tecnologias, muitas vezes pensa-se que se podem ignorar as variáveis ambientais externas, com a criação de microclimas artificiais com recurso a sensores avançados e microprocessadores capazes de controlar a temperatura e a humidade do edifício, seguindo-se essencialmente com o objectivo de garantir o conforto dos ocupantes. Daí decorrem alterações do microclima a que os diversos materiais e artefactos se adaptaram, originando condições deficientes para a sua conservação [14,56].

Torna-se assim imperativo que, antes de se proceder a qualquer alteração do microclima interior de um edifício antigo, se efectue um estudo rigoroso do microclima actual e passado de modo a compreender toda a sua evolução e a forma como a sua envolvente se adaptou.

Nos últimos anos começou-se a ter uma nova preocupação com a manutenção do microclima, principalmente nos edifícios de relevo histórico. Tem-se verificado uma evolução na abordagem efectuada, deixando-se a preocupação principal para com o conforto dos visitantes e passando-se a dar especial atenção aos parâmetros ambientais de modo a precaver o bom estado de conservação dos bens culturais, tentando manter um microclima constante, com ciclos de pequena amplitude.

1.2. Objectivos e metodologia

A presente dissertação tem por objectivo o estudo das características higrométricas da Igreja de São Cristóvão, em Lisboa, através da sua instrumentação e registo das condições ambientais.

Com a utilização de sensores, efectuou-se a monitorização automática de todo o edifício, dando-se maior importância à nave principal da Igreja. Foram também colocados sensores na sacristia, no altar-mor, na casa mortuária, no desvão da cobertura e na torre norte, de modo a obter as variações exteriores. Efectuaram-se leituras de 10 em 10 minutos no período decorrente entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012, que permitiram obter um conhecimento do microclima presente na Igreja durante as estações de Outono, Inverno e Primavera.

Procedeu-se a uma análise da evolução global das características higrométricas para verificar as principais tendências, avançando-se posteriormente para uma escala temporal mais reduzida, de uma semana por estação, tendo-se também verificado os ciclos de temperatura e humidade relativa presenciados no interior da Igreja.

Foram também realizadas duas baterias de leituras manuais à nave principal com recurso a um aparelho portátil e com o intuito de efectuar o mapeamento do edifício em termos de temperatura e humidade relativa, com a posterior realização de mapas de isolinhas com coloração e de gráficos tridimensionais.

Com este estudo pretende-se obter o conhecimento necessário do comportamento deste edifício em específico e de forma geral dos edifícios antigos de elevada inércia térmica para condições climáticas semelhantes às encontradas em Lisboa. Este conhecimento garante, caso se pretenda efectuar algum tipo de obra de conservação ou alteração que conduza à modificação do microclima, como a implementação de sistemas mecânicos de controlo do ambiente, se possa proceder sem correr o risco de deteriorar as convenientes condições de conservação dos materiais e artefactos. Pretende-se ainda verificar possíveis problemas de saturação e condensações superficiais.

1.3. Estrutura do trabalho

De modo a facilitar a consulta do presente trabalho e a compreensão dos resultados obtidos, começou-se por apresentar três capítulos teóricos, abordando os temas discutidos e apresentando o estado do conhecimento. Segue-se depois a metodologia, onde se descreve o edifício, caracteriza-se o clima e apresentam-se os aparelhos e procedimentos utilizados. Por fim apresenta-se a análise e discussão dos resultados obtidos e as respectivas conclusões.

Deste modo, a presente dissertação divide-se em 7 capítulos, como se especifica de seguida:

- ✓ Capítulo 1: apresentam-se as motivações e enquadramento do tema, os objectivos e o plano de trabalhos, introduzindo-se os assuntos em debate e as variáveis em análise;
- ✓ Capítulo 2: efectua-se a descrição dos processos de transferência de calor, mais precisamente a condução, convecção e radiação. Descreve-se também a inércia térmica e sua importância para os edifícios, possibilitando-se assim uma percepção mais rigorosa dos assuntos debatidos ao longo da dissertação;

- ✓ Capítulo 3: descreve-se o conceito de microclima, aprofundando-se a descrição de várias propriedades necessárias para a correcta compreensão do tema em questão, como a temperatura, a pressão parcial de vapor de água, a concentração de vapor de água, a humidade absoluta, a humidade relativa, a temperatura de ponto de orvalho e as condensações superficiais;
- ✓ Capítulo 4: debate-se a importância da temperatura e da humidade relativa para a conservação dos materiais e artefactos de valor histórico, descrevendo-se as diversas formas de degradação e a importância dos ciclos diários e sazonais;
- ✓ Capítulo 5: apresenta-se a descrição e a localização do edifício e do clima verificado em Lisboa. Apresentam-se ainda a descrição dos diversos aparelhos utilizados para a obtenção dos dados e o procedimento experimental seguido;
- ✓ Capítulo 6: apresentam-se os resultados obtidos sob a forma de gráficos, mostrando-se as principais tendências através de gráficos gerais, refinando-se depois o período de análise para uma semana por estação do ano, apresentando-se também os ciclos interiores de temperatura e humidade relativa. Efectua-se também a discussão destes mesmos resultados;
- ✓ Capítulo 7: apresentam-se as principais conclusões obtidas com a elaboração da dissertação e avança-se com desenvolvimentos futuros que se consideram importantes para aprofundar o conhecimento acerca do assunto em debate.

2. Processos de transferência de calor e inércia térmica

Para a compreensão de todos os mecanismos relacionados com a análise do clima interior de um edifício, relativamente a temperaturas, humidades e suas permutas entre o espaço aberto e as superfícies, é imperativa a compreensão dos processos de transmissão de calor e a importância da inércia térmica e sua relação com os restantes processos, especialmente para os casos de análise de edifícios antigos com paredes espessas.

Designa-se por transferência de calor o processo referente às trocas térmicas entre dois corpos a temperaturas diferentes, ocorrendo transferência de calor do corpo mais quente para o mais frio até se atingir o equilíbrio.

Podem ocorrer transferências de calor por condução, convecção e radiação. As trocas por condução e convecção requerem contacto directo entre os corpos que sofrem as trocas térmicas, enquanto na radiação tal não é necessário. A condução é um processo típico, mas não exclusivo, dos corpos sólidos; já a convecção está associada aos fluidos.

A inércia térmica evidencia também um papel de grande relevância no estudo térmico dos edifícios, especialmente em edifícios antigos, onde os seus elementos construtivos possuem grande massa, contornando assim a sua menor resistência térmica. Uma elevada inércia térmica provoca um desfasamento entre as temperaturas exteriores e interiores, o que torna o interior dos edifícios mais quente que o exterior no Inverno e o inverso no Verão.

Para as secções 2.1., 2.3. e 2.4. seguiu-se a referência bibliográfica [26].

2.1. Condução

O processo de condução corresponde a uma troca de calor entre dois corpos a diferentes temperaturas e em contacto. A sua ocorrência é mais comum em corpos sólidos, mas também pode ocorrer em fluidos.

A um material com uma dada temperatura corresponde um determinado estado de agitação molecular, que aumenta com o aumento da temperatura. Entre duas zonas com temperaturas diferentes essa agitação transmite-se da que tiver uma maior agitação para a outra, até se atingir um equilíbrio global. Compreende-se assim a necessidade de contacto físico entre os corpos e o facto de a transferência de calor se processar do corpo mais quente para o mais frio.

É possível determinar as transferências de calor através de um corpo com recurso às noções de quantidade de calor Q (em W) ou de fluxo de calor q (em W/m²), como se pode ver na equação 2.1:

$$q = \frac{Q}{A} \quad (2.1)$$

em que A (em m^2) é a área perpendicular ao sentido do fluxo através da qual ocorre transmissão de calor.

Segundo Fourier, na formulação da sua teoria analítica do calor, o fluxo de calor numa dada direcção é proporcional ao gradiente de temperatura nessa mesma direcção. Assumindo-se a condução unidireccional segundo a direcção x , tem-se:

$$q_x = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

em que a constante de proporcionalidade λ é a condutibilidade térmica do material em análise (em $W/m \cdot ^\circ C$). A condutibilidade térmica é uma característica própria de cada material, que traduz a forma como este se deixa atravessar pelo calor, e pode ser definida como a quantidade de calor que atravessa a unidade de espessura do material por unidade de área e unidade de diferença de temperatura. Assim, um material com um valor de condutibilidade térmica reduzido corresponde a um bom isolante térmico. O sinal negativo decorre do facto de as transferências de calor ocorrerem das temperaturas mais elevadas para as mais baixas. A equação 2.2 é designada como lei de Fourier.

Considere-se um meio homogéneo no qual se define um volume elementar $dx \cdot dy \cdot dz$ (figura 2.1) sujeito a diferenças de temperatura entre as suas faces.

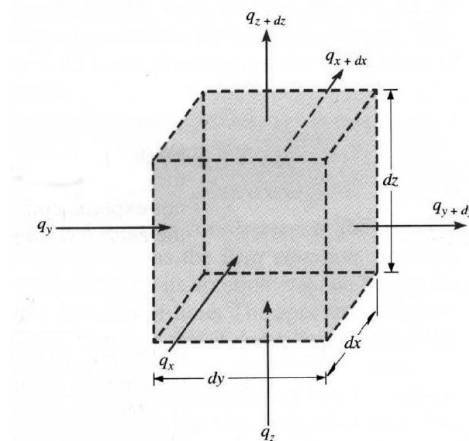


Figura 2.1 - Volume elementar $dx \cdot dy \cdot dz$ [26]

Isto motiva a ocorrência de transferências de calor por condução através desse meio, cujos fluxos perpendiculares a cada uma das faces do volume elementar, nas três direcções principais, podem ser designados como q_x , q_y e q_z . Os fluxos de calor nas faces opostas podem assim ser descritos através das seguintes equações:

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{dq_x}{dx} dx \quad (2.3)$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{dq_y}{dy} dy \quad (2.4)$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{dq_z}{dz} dz \quad (2.5)$$

O que significa, por exemplo, para a equação 2.3, que a componente segundo a direcção x do fluxo de calor em $x+dx$ é igual ao valor dessa componente em x acrescida do produto da sua variação em função de x multiplicada pelo comprimento elementar dx .

Se no interior do meio em análise existir uma fonte de calor, a energia gerada pode ser quantificável através da expressão:

$$\dot{E}_g = q' dx dy dz \quad (2.6)$$

em que q' é o fluxo de calor gerado por unidade de volume (em W/m³). Por outro lado, a quantidade de energia armazenada no volume considerado pode ser escrita na forma:

$$\dot{E}_{st} = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (2.7)$$

em que ρ é a massa volúmica do material (em Kg/m³), c_p o calor específico (em J/Kg.°C), T a temperatura e t o tempo. A expressão traduz, em consequência, a variação energética em função do tempo.

Se \dot{E}_{in} e \dot{E}_{out} forem, respectivamente, a energia transferida para o volume elementar e libertada pelo volume, o balanço energético global pode ser apresentado através da equação 2.8:

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_g - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st} \quad (2.8)$$

Considerando que \dot{E}_{in} corresponde aos fluxos perpendiculares a cada face q_x , q_y e q_z e \dot{E}_{out} aos fluxos nas faces opostas, a equação 2.8 pode ser escrita na seguinte forma:

$$q_x + q_y + q_z + q' dx dy dz - q_{x+dx} - q_{y+dy} - q_{z+dz} = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (2.9)$$

Substituindo as equações 2.3, 2.4 e 2.5 na equação 2.9, tem-se:

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz + q' dx dy dz = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (2.10)$$

De acordo com a lei de Fourier, a condução segundo as três direcções consideradas pode ser expressa nas equações:

$$q_x = -\lambda \cdot dy \cdot dz \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.11)$$

$$q_y = -\lambda \cdot dx \cdot dz \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2.12)$$

$$q_z = -\lambda \cdot dx \cdot dy \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.13)$$

Substituindo as equações 2.11, 2.12 e 2.13 na equação 2.10 obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy dz + \dots + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) dx dy dz + q' dx dy dz = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (2.14)$$

Ao dividir a equação 2.14 pelo volume elementar ($dx \cdot dy \cdot dz$), obtém-se a designada equação geral da difusão de calor:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q' = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.15)$$

Esta equação surge em função do tempo, possibilitando a análise dos fenómenos em condições reais. Uma situação deste tipo designa-se como regime variável.

A análise dos fenómenos em função do tempo pode ser bastante simplificada nos casos em que é possível assumir condições de sistema global, ou seja, aqueles em que as variações de temperatura ao longo dos três eixos são desprezáveis, tornando-se assim exclusivamente dependentes do factor tempo. No entanto, não se dará destaque a este mecanismo no decorrer do presente trabalho.

Em muitas circunstâncias a perda de precisão resultante de se considerar a difusão de calor independente do tempo pode ser compensada pela facilidade de cálculo daí resultante. Quando a análise térmica é efectuada independentemente do tempo utiliza-se a designação de regime permanente, regida pela seguinte equação:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q' = 0 \quad (2.16)$$

Se, por outro lado, não existir geração de calor no interior do corpo, a equação pode ainda ser simplificada na forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (2.17)$$

E no caso da condução unidireccional ter-se-á:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0 \quad (2.18)$$

De onde se pode concluir que o fluxo de calor é constante ao longo da direcção considerada.

A equação geral da difusão de calor pode ainda ser simplificada de uma forma diferente. Caso se assuma que a condutibilidade térmica λ é constante, a equação 2.15 assume a seguinte forma, designada por equação de Fourier-Biot:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q'}{\lambda} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.19)$$

em que a é uma característica termo-física dos materiais, designada como difusidade térmica e obtida da forma seguinte:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (2.20)$$

De igual forma, a equação 2.16 também pode ser simplificada para λ constante, designando-se como equação de Poisson:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q'}{\lambda} = 0 \quad (2.21)$$

Enquanto a mesma simplificação aplicada à equação 2.17 conduz à designada equação de Laplace:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (2.22)$$

2.2. Inércia térmica

A análise térmica em regime permanente é muito cómoda de efectuar. Permite equacionar alguns fenómenos correntes, tais como aqueles em que eventuais variações são pequenas ou sempre que se pretendem conhecer valores médios para um determinado período de tempo. Esta análise, contudo, torna-se limitativa noutras situações, como se verifica com o estudo da influência da inércia térmica.

É conhecido o comportamento de algumas construções antigas com grande massa, como as catedrais medievais, onde se encontra uma temperatura inferior à exterior no Verão e o inverso no Inverno, tornando-se claramente perceptível a presença de um desfasamento entre as temperaturas exteriores e interiores. Isto depende de vários factores, entre os quais se destaca a massa dos materiais que constituem as envolventes exteriores [18].

Como se viu, as transferências de calor podem ser analisadas em regime variável, que normalmente é encarado como um processo moroso, mas que tem vindo a ser facilitado com o recurso a métodos computacionais, em particular quando se recorre à resolução numérica da equação de Fourier-Biot.

Considere-se uma parede que separa dois ambientes à mesma temperatura. Nessas condições, o fluxo de calor que a atravessa é nulo. Suponha-se agora que num dos ambientes a temperatura se eleva alguns graus, por forma a que $T_{ext} > T_{int}$. O fluxo de calor nestas condições pode ser facilmente determinado através da equação 2.23 [26]:

$$q_1 = U \cdot (T_{ext} - T_{int}) \quad (2.23)$$

em que U é o coeficiente de transmissão térmico, demonstrando-se a sua importância e forma de cálculo na secção 2.5 do corrente texto.

Este fluxo não atravessa imediatamente a parede; ele tem de a aquecer gradualmente, sendo que a energia acumulada na parede é dada pela equação 2.7, e só ao fim de algum tempo a onda de calor atinge o ambiente interior.

A análise da equação 2.7 permite constatar que a energia armazenada num elemento de construção é função do tempo, da massa volúmica, do calor específico, do volume e da condutibilidade térmica do elemento.

Considere-se agora que as variações da temperatura exterior são periódicas, variando de forma sinusoidal entre os valores mínimos e máximos, com os quais se pode determinar a média (figura 2.2.a), assumindo-se a temperatura interior como constante. Por exemplo, para a situação de uma parede infinitamente ligeira, para a qual as transferências de calor se processam instantaneamente, o fluxo de calor que atravessa a parede em cada instante pode ser obtido pela equação 2.23 e representado na figura 2.2.b. Os valores positivos ou negativos do fluxo determinam o sentido em que a transmissão de calor ocorre. Note-se que existe uma concordância total de tempo entre os vários pontos singulares dos dois gráficos referidos, não ocorrendo qualquer desfasamento entre as temperaturas e os fluxos [26].

Se a parede tiver uma massa infinita, ocorre um amortecimento total do fluxo de calor, que nunca chega a afectar o ambiente interior, o que se traduz por um fluxo constante (figura 2.2.c) dado por [26]:

$$q_2 = U \cdot (T_{em} - T_i) \quad (2.24)$$

em que T_{em} é a temperatura média exterior.

Nas situações correntes, os elementos de construção situam-se entre os dois casos referidos, já que a sua massa nem é nula nem infinita. A curva das variações de fluxo correspondente oscila assim em torno de q_2 , com a particularidade de ter amplitudes menores do que q_1 e um certo desfasamento [26] (figura 2.2.d), sendo dada em cada instante por:

$$q_3 = U \cdot (T_{em} - T_i) + \mu \cdot U \cdot (T_e - T_{em}) \quad (2.25)$$

em que μ é um factor de amortecimento que depende da inércia térmica da construção. Assim, pode-se definir inércia térmica como a capacidade que os elementos construtivos podem dispor de amortecer e desfasar o fluxo de calor que os atravesse [18].

Tendo em conta que a inércia térmica é função da massa do elemento, facilmente se compreende que quanto menor for o isolamento térmico de um material, tanto maior será a sua inércia térmica, na medida em que, como é sabido, a resistência térmica varia na relação inversa à massa volúmica.

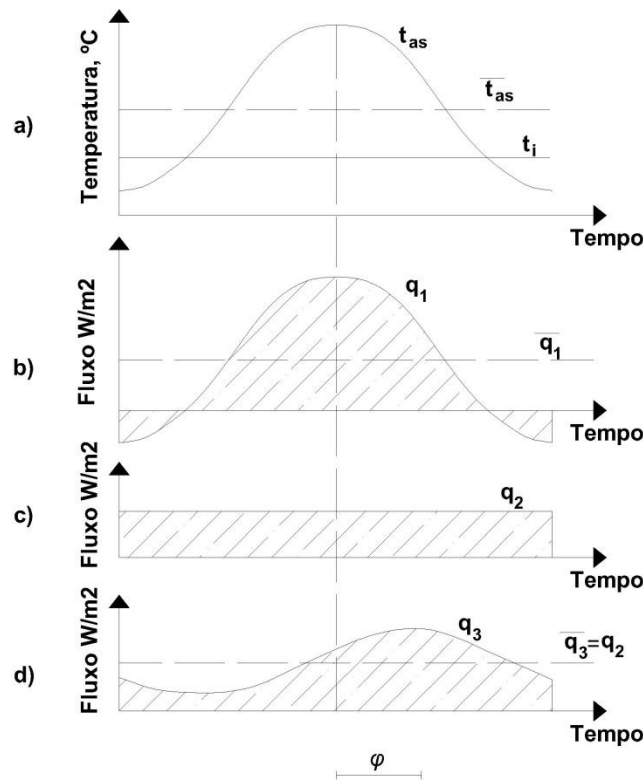


Figura 2.2 - Conceito de Inércia Térmica [26]

Em 1944, Mackey e Wright desenvolveram um método gráfico que possibilita a avaliação do comportamento de elementos de construção em regime unidireccional em condições de regime periódico, entendido como aquele em que numa das fases o elemento está sujeito a variações periódicas de temperatura do tipo das verificadas ao longo de um dia ou de um ano. Assim, essa temperatura em função do tempo pode ser dada por [26]:

$$T(t) = T_0 + T_a \cdot \text{sen}(w \cdot t) \quad (2.26)$$

Significando que as variações ocorrem em torno de um valor médio T_0 com uma amplitude T_a e um período $2\pi/w$. A partir da resolução da equação de Fourier-Biot (equação 2.19) para o regime unidireccional [26], chegaram à seguinte equação:

$$T_{si} = T_i + \frac{U}{h_f} \cdot (T'_{as} - T_i) + \mu \cdot T_n \cdot \cos(w \cdot t - \Phi - \varphi) \quad (2.27)$$

em que T'_{as} é o valor médio diário da temperatura do ar, T_n a amplitude da harmónica, Φ o ângulo de fase da harmónica e μ e φ são, respectivamente, os factores de amortecimento e de atraso. Define-se factor de amortecimento como a capacidade que a envolvente tem de diminuir a amplitude das variações térmicas e factor de atraso como sendo o tempo que a energia incidente na face exterior demora a atingir a face interior da parede [18].

A equação 2.27 pode ser simplificada para a forma:

$$T_{si} = T_{se} + \mu \cdot [T_{as} \cdot (T - \varphi) - T'_{as}] \quad (2.28)$$

em que T_{as} é a temperatura do ar, de onde se conclui que a temperatura superficial interior tem a evolução da temperatura superficial exterior com um atraso de φ horas e um amortecimento μ .

Os factores de amortecimento e de atraso de elementos homogéneos podem ser obtidos em tabelas ou a partir das seguintes equações [26]:

$$\mu = e^{-d \cdot \sqrt{\frac{\pi}{\alpha \cdot t}}} = e^{-\frac{d}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{t} \cdot (\lambda \cdot \rho \cdot c_p)}} \quad (2.29)$$

$$\varphi = \frac{d}{2} \cdot \sqrt{\frac{t}{\pi \cdot a}} = \frac{d}{2 \cdot \lambda} \cdot \sqrt{\frac{t}{\pi} \cdot (\lambda \cdot \rho \cdot c_p)} \quad (2.30)$$

em que d é a espessura do elemento, t o período da onda de temperatura, α a difusibilidade térmica ($\alpha = \lambda / \rho \cdot c_p$), λ a condutibilidade térmica, ρ a massa volúmica e c_p o calor específico. O produto $\lambda \cdot \rho \cdot c_p$ é um condicionante daqueles factores, sendo frequentemente designado por admissividade.

Desta análise resulta que o factor de atraso varia linearmente com a espessura do elemento, enquanto no amortecimento essa variação é exponencial. Logo, no caso de a espessura duplicar, o factor de amortecimento atinge o quadrado do valor inicial.

Como se referiu anteriormente, as definições dos factores de amortecimento e de atraso apenas são válidas para elementos homogéneos, situação que raramente se verifica. Para permitir a sua aplicação aos casos de elementos heterogéneos, Mackey e Wright propuseram a assunção de um novo modelo fictício, com a resistência térmica a ser igual ao somatório das resistências térmicas das várias camadas que constituem o elemento heterogéneo e com uma admissividade equivalente [26], dada por:

$$(\lambda \cdot \rho \cdot C_p)_{eq} = \frac{1,1 \cdot (\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} \cdot (\lambda_i \cdot \rho_i \cdot C_{pi})) + (\lambda_0 \cdot \rho_0 \cdot C_{p0}) \cdot (\frac{d_0}{\lambda_0} - 0,1 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i})}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i}} \quad (2.31)$$

A importância da inércia térmica pode ser evidenciada a partir dos seguintes valores de amortecimento e de atraso μ e φ de soluções construtivas correntes, presentes na tabela 2.1:

Tabela 2.1 - Valores de amortecimento e atraso para soluções construtivas correntes [26]

Solução construtiva	μ	φ
Alvenaria de pedra rebocada (esp, 0,44 m)	0,44	12 h
Parede de betão (esp, 0,19 m)	0,23	5 h
Parede dupla de tijolo furado (esp, 0,27 m)	0,08	7 h
Painel madeira/poliestireno/madeira	0,11	0,4 h

2.3. Convecção

A convecção pode ser entendida, em termos simples, como uma forma específica de condução, em que a variação de temperatura das moléculas implica a alteração relativa do seu posicionamento e, consequentemente, a variação da sua massa volúmica, de onde resultam os movimentos típicos da convecção. A convecção é um mecanismo de transmissão de calor próprio dos fluidos, já que pressupõe a existência de movimentos que são incompatíveis pelos corpos sólidos.

Considere-se o caso de uma parede com uma temperatura superior à do ar ambiente. As camadas de ar em contacto com a parede aumentam de temperatura por condução e transmitem esse acréscimo de temperatura também por condução às camadas adjacentes. Mas uma maior temperatura corresponde a um estado de maior agitação molecular, do qual resulta um afastamento entre as moléculas, que é tanto maior quanto mais elevado é o nível de agitação (ou seja, a temperatura). Daí decorre que o número de moléculas por unidade de volume decresce, o que se traduz por uma diminuição da massa volúmica e, consequentemente, por uma ascensão desse ar mais quente por efeito da impulsão. O ar que sobe é substituído por ar mais frio, prosseguindo o processo de forma equivalente. Nesse contexto, torna-se claro que as trocas térmicas por convecção são mais elevadas do que por condução, já que naquele caso os diferenciais térmicos são maiores em consequência dos movimentos referidos.

Mas imagine-se agora o caso de um tecto em que a temperatura é superior à do ambiente. Neste caso, verificam-se os mesmos fenómenos referidos anteriormente, mas não ocorrerá qualquer movimento do ar na medida em que o ar quente já se encontra na zona mais alta do espaço. Logo, as trocas de calor serão efectuadas fundamentalmente por condução entre as sucessivas camadas de ar. Pode então considerar-se que num fluido a condução corresponde à situação limite da convecção.

O fluxo de calor por convecção entre uma superfície à temperatura T_1 e o ambiente com temperatura T_2 é dado pela lei do arrefecimento de Newton:

$$q_{conv} = h_c \cdot (T_1 - T_2) \quad (2.32)$$

em que h_c é a condutância térmica superficial por convecção. Esta condutância não é específica do fluido em causa e depende de circunstâncias particulares como a geometria da superfície, a natureza do fluido e o tipo de movimento existente. Este último factor é extremamente condicionante, pois permite dividir a convecção em dois tipos com características diferentes: convecção natural, quando os movimentos decorrem essencialmente das características de massa volúmica do fluido em consequência das variações de temperatura; e convecção forçada quando o movimento do fluido é exterior e independente daquelas variações.

As diferenças de eficiência na transmissão de calor entre a convecção natural e forçada são intuitivas e usadas frequentemente. Repare-se por exemplo no que se passa com a comida: pode-se deixá-la arrefecer por convecção natural, com a criação de correntes convectivas pelo aquecimento do ar nas suas imediações ou, por outro lado, pode-se soprar sobre o objecto quente e dessa forma a velocidade do ar será consequência do sopro e não do movimento convectivo, de onde decorre um considerável acréscimo de eficiência no arrefecimento. Uma maior velocidade do ar significa que em

cada instante o corpo contactará com ar mais fresco, já que o ar previamente aquecido por contacto com o corpo quente se terá afastado dele.

2.3.1. Convecção natural

A convecção natural é um fenómeno que interessa preferencialmente aos ambientes interiores dos edifícios, aqueles em que a velocidade do ar é suficientemente baixa para poder ser desprezada, bem como em todas as situações de espaços de ar não ventilados no interior de elementos de construção, tal como se verifica no corrente caso de estudo.

Nessas condições verifica-se que os movimentos que o ar pode assumir resultam do seu aquecimento diferenciado, do qual resultam massas volúmicas diversas, que propiciam movimentos ascendentes do ar mais quente (com menor massa volúmica) e descendentes do ar mais frio (com maior massa volúmica).

Tendo em conta o tipo de mecanismos que ocorrem na convecção natural, é fácil compreender que as transferências de calor que ocorrem desta forma são função da geometria e da orientação das superfícies. Considere-se o caso corrente de uma superfície vertical, cuja temperatura é superior à do ar. Nessas circunstâncias, o perfil de temperaturas variará entre um máximo junto à superfície e um mínimo correspondente à temperatura do ar; no caso das velocidades, o respectivo perfil é diverso do que ocorre na convecção forçada já que a velocidade será nula, quer junto à superfície, quer no extremo da camada limite (figura 2.3), o que se compreende na medida em que para além desse limite deixará de haver convecção. Pelo facto de na convecção natural os movimentos do ar (e consequentemente as suas velocidades) decorrerem das variações de temperatura, as espessuras das camadas limite térmica e de velocidades podem ser assumidas como equivalentes.

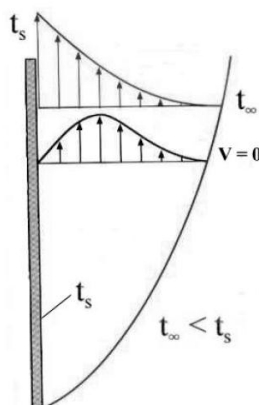


Figura 2.3 – Convecção natural-camadas limite [26]

2.4. Radiação

Todos os corpos emitem radiação electromagnética, que encontra condições preferenciais de transmissão através de misturas gasosas ou de sólidos semi-transparentes, nos quais a absorção é fraca. A radiação propaga-se à velocidade da luz ($c = 3 \times 10^8$ m/s), possuindo como características próprias uma determinada frequência f e comprimento de onda λ , relacionados da seguinte forma:

$$c = \lambda \cdot f \quad (2.33)$$

A propagação da radiação pode ser analisada em termos da teoria quântica, segundo a qual a interação da radiação com a matéria é feita sob a forma de quanta ou fótons, que possuem energia quantificável através da expressão seguinte:

$$e = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2.34)$$

em que h é a constante de Planck que assume o valor de $6,635 \times 10^{-34}$ J.s. Desta equação decorre que a energia da radiação electromagnética é inversamente proporcional ao seu comprimento de onda, o que é compatível com o facto conhecido de serem as radiações de menor comprimento de onda, ou seja, as de maior energia, que têm um impacte mais negativo sobre os seres biológicos.

A análise do comportamento de edifícios incide numa gama de radiação mais restrita, designada como radiação térmica, cujo comprimento de onda varia entre 0,1 e 100 μm e na qual estão incluídas a radiação ultravioleta (0,1 a 0,38 μm), a luz visível (0,38 a 0,76 μm) e a radiação infra-vermelha (0,76 a 100 μm). A radiação térmica emitida pelo sol situa-se no intervalo 0,1 a 3 μm e é designada como radiação solar.

O valor máximo de energia emitida por um corpo à temperatura absoluta T pode ser obtido através da designada lei de Stefan-Boltzmann:

$$Q_{max} = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (2.35)$$

em que A é a área (em m^2) e σ a constante de Stefan-Boltzmann que assume o valor absoluto de $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ em unidades do sistema internacional. Esse valor máximo é relativo à energia emitida por uma abstracção física designada por corpo negro. A radiação emitida por corpos reais é inferior à definida anteriormente, na medida em que uma determinada superfície emite sempre uma quantidade de energia inferior a um corpo negro que estivesse à mesma temperatura. A relação entre a energia realmente emitida por uma superfície e o valor correspondente à emissão do corpo negro designa-se emissividade ϵ , a qual pode ser considerada como uma medida da eficiência com que um corpo emite energia, comparativamente com o corpo negro. A generalidade dos materiais de construção apresenta emissividades na ordem dos 0,80, sendo que o valor máximo é 1.

Assim, a energia emitida por um corpo real pode ser calculada através da equação 2.36:

$$Q_{max} = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (2.36)$$

Outra característica importante das superfícies é o coeficiente de absorção α , que traduz a eficiência com que determinada superfície absorve energia, variando entre zero e um. Por definição, um corpo negro tem um coeficiente de absorção igual a 1. Quanto maior for o coeficiente de absorção mais energia será absorvida por uma superfície, o que poderá ser positivo em condições de tempo frio e negativo no oposto.

Quando uma determinada superfície está completamente envolvida por outra bastante maior cujas temperaturas sejam respectivamente T_s e T_{env} , as transferências de calor por radiação podem ser determinadas através da equação 2.37:

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_{env}^4) \quad (2.37)$$

em que T_s é a temperatura da superfície envolvida e T_{env} a temperatura da superfície envolvente.

Em condições correntes a transmissão de calor nas circunstâncias referidas ocorrerá não só por radiação, mas também por convecção. Nesses casos as quantidades de energia transferida poderão ser obtidas pela equação 2.38:

$$Q = h \cdot A \cdot (T_s - T_{env}) \quad (2.38)$$

em que h é a condutância térmica superficial média para a radiação e convecção. Trata-se de uma simplificação que facilita bastante o cálculo das transferências de calor destes dois tipos. Os efeitos da radiação são significativos e influenciam bastante no cálculo da condutância nos casos de convecção natural, mas são praticamente irrelevantes e quase sempre ignorados nos casos de convecção forçada.

2.4.1. Comportamento dos corpos face às suas características

O comportamento da superfície de um corpo que recebe energia radiante varia em função das suas características. Se o corpo for opaco, a energia incidente é parcialmente absorvida pelo corpo e reflectida pela superfície. Se, pelo contrário, o corpo for transparente, uma parte da energia incidente atravessá-lo-á, enquanto a restante será absorvida e reflectida.

De modo a materializar este pressuposto definem-se coeficientes de absorção α , de reflexão ρ (também designado por reflectividade) e de transmissão τ (ou transmissividade). Para o caso de corpos transparentes obtém-se a seguinte relação:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.39)$$

Se o corpo for opaco a relação é simplificada:

$$\alpha + \rho = 1 \quad (2.40)$$

Interessa ainda referir que os valores destes coeficientes dependem dos materiais, das características das superfícies, do tipo de radiação e do ângulo de incidência.

Na tabela 2.2 são apresentados valores dos coeficientes de absorção da radiação solar e emissividade a baixa temperatura com base no seu comportamento geral.

Tabela 2.2 – Coeficientes de absorção da radiação solar α e emissividade a baixa temperatura ϵ de materiais de construção correntes [26]

Material de construção	α	ϵ
Pedra escura	0,65-0,80	0,85-0,95
Pedra calcária	0,50-0,70	0,36-0,90
Mármore claro polido	0,44	0,93
Cerâmicos Vermelhos	0,63	0,93
Betão	0,60	0,88
Reboco claro	0,30-0,50	0,85-0,95
Vidro	0,05	0,90-0,95

Note-se que o coeficiente de absorção é influenciado pelas características das superfícies e apresenta valores mais baixos para cores claras e em superfícies polidas.

É também importante mencionar que o tipo de orientação das superfícies à radiação desempenha um papel importante, servindo para determinar o grau de captação da radiação, que nas situações mais comuns será radiação solar. Em termos quantificáveis designa-se factor de forma de uma superfície em relação a outra ao parâmetro puramente geométrico (independente das características da superfície) que permite quantificar a quantidade de energia emitida por uma superfície e que atinge outra. O factor de forma da superfície i em relação à superfície j permite quantificar a fracção da radiação emitida pela primeira e que atinge a segunda, representando-se como F_{ij} .

A radiação que atinge uma superfície não é, em geral, totalmente absorvida, podendo voltar a atingir a superfície emissora. Um caso particular de factor de forma é F_{11} , que representa a energia emitida por uma superfície e que a volta a atingir directamente. Isto só é possível para superfícies côncavas como se exemplifica na figura 2.4.

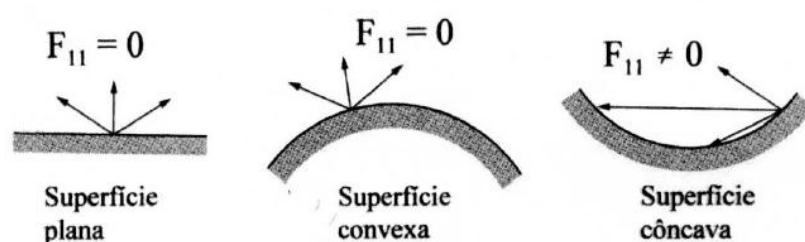


Figura 2.4 – Factores de forma de uma superfície em relação a si própria [26]

Os factores de forma podem variar entre os valores limite de 0, no caso em que não haja linha de visão entre as duas superfícies, e 1, quando a superfície receptora envolve completamente a superfície emissora, assegurando condições para ser atingida pela totalidade da radiação emitida.

A obtenção de factores de forma pode ser efectuada através da integração de equações apropriadas, o que na maior parte dos casos é moroso e de resolução complexa. É possível encontrar na

bibliografia sobre o tema inúmeras configurações, para as quais esses factores são apresentados de uma forma analítica ou gráfica.

2.5. Outros parâmetros importantes para as trocas de calor

Apesar dos fenómenos descritos nos pontos anteriores, muitas vezes a sua resolução torna-se morosa, sendo importante recorrer a um conjunto de simplificações para efectuar algumas verificações rápidas sem perder demasiado rigor.

De modo a compreender estes processos simplificativos torna-se imperativa a compreensão de alguns termos básicos e sua relação com a envolvente, como as temperaturas superficiais, a condutância térmica, a resistência térmica e o coeficiente de transmissão térmica.

Note-se que para um elemento construtivo que separa o ambiente interior do exterior, com temperaturas respectivamente $t_i > t_e$, a temperatura superficial interior t_{si} será inferior à temperatura interior e a temperatura superficial exterior t_{se} será superior à temperatura do ar exterior.

Considerando que a transmissão de calor segue um regime permanente e comporta-se unidireccionalmente, obtêm-se as seguintes expressões para as temperaturas superficiais [26]:

$$t_{se} = t_e + \frac{1}{h_e} \cdot U \cdot (t_i - t_e) \quad (2.41)$$

$$t_{si} = t_i + \frac{1}{h_i} \cdot U \cdot (t_i - t_e) \quad (2.42)$$

em que t_i e t_e representam a temperatura interior e exterior, respectivamente, em graus centígrados, h_i e h_e as condutâncias térmicas superficiais resultantes da soma das componentes relativas às trocas térmicas por radiação e convecção e U o coeficiente de transmissão térmica [26], dado por:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_e} + R + \frac{1}{h_i} \quad (2.43)$$

em que R representa a resistência térmica do elemento construtivo, obtida como o somatório do quociente entre as espessuras e as condutibilidades térmicas de cada camada atravessada perpendicularmente pelo fluxo de calor.

Os quocientes $1/h_i$ e $1/h_e$ designam-se, respectivamente, como resistência térmica superficial interior e exterior. Estes valores encontram-se disponíveis na tabela 2.3 para fluxos verticais e horizontais e período de aquecimento e arrefecimento.

Tabela 2.3 – Resistências térmicas superficiais convencionais [58]

Sentido do fluxo de calor		Resistências térmicas superficiais ($\text{m}^2, ^\circ\text{C/W}$)		
		$R_{se}=1/h_e$	$R_{si}=1/h_i$	$R_{se}+R_{si}$
Horizontal		0,04	0,13	0,17
Vertical	Ascendente	0,04	0,10	0,14
	Descendente	0,04	0,17	0,21

3. Microclima, temperatura e humidade

3.1. Microclima

O termo “microclima” pode-se separar no prefixo micro e na palavra clima, definindo-se de forma generalista como o clima observado em determinada área, delimitada pelo prefixo.

Para a aplicação que se pretende não se delimitará a área em função do micrón como submúltiplo do metro, designando-se por microclima o objecto específico a ser estudado, entendendo-se por objecto não apenas um artefacto, mas por exemplo um edifício histórico, uma estátua ou uma pequena exposição, a sua envolvente e as trocas térmicas desenvolvidas entre si.

No fundo, o termo microclima refere todo o ambiente que se quer estudar, que tem influência directa para o caso de estudo, e a interacção entre o ar e os objectos envolventes.

Para a utilização pretendida pode-se definir microclima como a síntese das condições físicas ambientais (como as distribuições de temperatura e humidade relativa no tempo e no espaço, os valores flutuantes e principais tendências, valores médios e extremos, gradientes espaciais e frequência das variações), quer devido a variáveis atmosféricas (como a temperatura, a humidade, o sol e o vento) ou trocas com outros corpos (emissão de infravermelhos, aquecimento, ventilação e iluminação) durante um período de tempo representativo de todas as condições determinadas pelos factores naturais e artificiais.

Quando uma pesquisa não puder continuar por um intervalo de tempo que seja estatisticamente representativo de todas as condições, devem pelo menos ficar documentadas as principais variações de modo a entender a evolução e tendência do clima em estudo [7, 66].

3.2. Temperatura

A temperatura é a condição que determina a direcção do fluxo de calor entre dois corpos, isto é, com a passagem de calor do mais quente para o mais frio.

Do ponto de vista da termodinâmica, a temperatura T representa a média da energia cinética E_c das moléculas de determinado gás, de acordo com o princípio da equipartição da energia [7]:

$$E_c = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T \quad (3.1)$$

em que k é a constante de Boltzmann e assume o valor de $1,38 \times 10^{-23}$ J/K.

Devido a esta relação, T é também conhecido como temperatura molecular. Em meteorologia é comum utilizar o termo temperatura de bolbo seco.

Nesta sequência, a temperatura em Kelvin (K) será representada com a letra maiúscula T e a temperatura em graus centígrados ($^{\circ}\text{C}$) com a letra minúscula t . As duas temperaturas estão relacionadas da seguinte forma:

$$t = T - 273,16 \quad (3.2)$$

Contudo a variação de temperaturas é igual para os dois casos.

O valor 273,16 K corresponde à temperatura do ponto triplo da água, ou seja, a temperatura para a qual os três estados da matéria (sólido, líquido e gasoso) coexistem em equilíbrio termodinâmico.

O conceito de temperatura pode ser facilmente extrapolado dos gases para os líquidos e sólidos, utilizando-se frequentemente a definição simplista de que a temperatura é a variável medida por um termómetro.

Na ausência de erros o termómetro mede apenas a temperatura do seu bolbo, podendo esta não coincidir exactamente com a temperatura do objecto em estudo, pois o equilíbrio termodinâmico envolve um equilíbrio entre as trocas caloríficas por condução, convecção e radiação, que não são iguais para todos os objectos e materiais. A temperatura pode mesmo variar ao longo da superfície de um mesmo objecto [7].

3.2.1. A temperatura nos edifícios

Num edifício, a influência das forças externas (por exemplo: a radiação solar, a condução de calor através da cobertura e paredes e trocas de ar através de aberturas) depende das características arquitectónicas e da escolha de materiais. Paredes finas ou compostas por materiais com elevadas condutibilidades térmicas são sensíveis aos ciclos diários de temperaturas. As janelas podem permitir a penetração de raios solares e criar um efeito estufa, podendo também ter influência nas trocas de ar com o exterior. Exposições diferentes para o mesmo edifício conduzem a um saldo de calor diferente, onde nem todas as divisões apresentam a mesma temperatura.

As zonas interiores de um edifício são mais estáveis em termos de temperatura, sendo isto por demais evidente em pisos térreos, onde o solo apresenta uma grande reserva de calor e equilibra o balanço. Para pisos em contacto com a cobertura passa-se exactamente o oposto: a cobertura recebe radiação solar durante o dia e perde radiação infravermelha durante a noite. Sistemas de climatização e a presença de pessoas podem alterar completamente o equilíbrio natural do microclima [7].

Compreenda-se que numa sala fechada o ar quente sobe. O ar distribui-se de acordo com a sua densidade, ou seja, o ar quente e menos denso encontra-se no topo e o ar frio e mais denso encontra-se na zona inferior. Tende-se então a verificar uma estratificação do ar por temperaturas. Contudo, alguns factores podem impedir que isto se verifique, como quando as superfícies não estão em equilíbrio com a temperatura do ar, pela entrada de ar frio por aberturas localizadas nas zonas superiores. Note-se ainda que para os casos mais correntes, durante o Inverno, em que o tecto não é aquecido, esta estratificação tende a não se verificar, pois o ar ao atingir o topo do edifício vai arrefecer e ganhar densidade, proporcionando assim a ocorrência de correntes convectivas.

No caso de edifícios históricos, normalmente as paredes são grossas e têm uma grande capacidade de armazenar calor, mantendo o mesmo equilíbrio e uma estratificação térmica constante, excepto para a presença de factores de perturbação como sistemas de climatização, presença de pessoas ou iluminação. Estas paredes são muito eficazes no amortecimento dos ciclos térmicos diários e sazonais, apesar de em menor escala para estes últimos, contribuindo para a manutenção de um microclima interno estável.

No caso das Igrejas, por exemplo, a cobertura segue as variações sazonais com um pequeno desfasamento, enquanto o pavimento do piso térreo apresenta um desfasamento muito maior, de modo que no Verão encontra-se mais frio do que a temperatura ambiente, o que gera uma estratificação interna do ar. No Inverno o pavimento apresenta-se mais quente do que a cobertura, havendo a tendência para a ocorrência de correntes convectivas e consequente destruição da estratificação do ar por temperaturas [7].

Como se viu no parágrafo anterior, a estabilidade interna do ar pode ser vista, geralmente, de duas formas: verificando-se uma estratificação por temperaturas ou através da presença de correntes convectivas:

- a) No Verão, quando o pavimento está mais frio e o tecto está mais quente que o ar adjacente, as trocas entre o ar e as superfícies aumentam a intensidade da estratificação do ar por temperaturas, permanecendo imóvel;
- b) No Inverno, quando o pavimento está mais quente e o tecto está mais frio, o ar ao contactar com o pavimento mais quente vai aquecer, diminuindo de densidade e consequentemente subir, arrefecendo depois ao contactar com a cobertura mais fria, perdendo densidade e voltando a descer, gerando assim uma corrente convectiva.

Para edifícios com elevada inércia térmica, as condições meteorológicas externas têm uma influência limitada no microclima interior, sendo as principais contribuições provenientes de janelas, portas e outras aberturas. É assim normal que as paredes e a temperatura ambiente interior atinjam o equilíbrio com as temperaturas médias exteriores apenas no final do Verão e Inverno. Verifica-se ainda que no Outono a temperatura interna é mais elevada que a temperatura média exterior, estando próxima dos valores máximos diários, similares às temperaturas das paredes que acumulam calor durante os meses mais quentes [18].

3.3. Humidade

O ar é constituído por uma mistura de gases – cerca de 21% em volume de oxigénio, 78% de azoto e 1% de outros gases (CO₂, SO₂, etc.) – e vapor de água [26].

A utilização do termo corrente “humidade” torna-se ambíguo quando se pretende estudar ao pormenor o estado higrométrico do ar, sendo necessário recorrer à definição de propriedades mais específicas como a humidade absoluta, a concentração de vapor de água, a humidade relativa, a pressão de saturação e a temperatura de ponto de orvalho.

3.3.1. Pressão parcial de vapor de água

A primeira propriedade abordada será a pressão parcial de vapor de água, P_v .

Quando se dá a evaporação de moléculas de água, a pressão aumenta até um determinado limite. Quando alcançado, o número de moléculas que saem da água líquida iguala o número daquelas que retornam a partir da atmosfera, estabelecendo-se um equilíbrio dinâmico entre a evaporação e a condensação. Essa condição limite é independente da pressão do ar seco, dependendo apenas da temperatura, de acordo com a lei da independência das pressões parciais. Esta lei, conhecida como lei de Dalton, diz que o comportamento de qualquer gás numa mistura mecânica é independente da presença de outros gases e a pressão total é igual à soma das pressões parciais [26].

Define-se pressão parcial do vapor de água no ar, P_v , como a pressão que esse vapor teria se ocupasse sozinho o volume ocupado pela respectiva massa de ar (expressa em Pa), que pode ser calculada a partir do valor da concentração de vapor de água v (em Kg/m^3) [26] através da expressão:

$$P_v = 461,4 \cdot (t + 273,15) \cdot v \quad (3.3)$$

A pressão de saturação $P_{v,sat}$ [7], é calculada por meio da fórmula empírica atribuída a Magnus e Tetens:

$$P_{v,sat}(t) = P_{v,sat}(0) \cdot 10^{a \cdot t / (b+t)} \quad (3.4)$$

onde $P_{v,sat}(0)=611$ Pa, $a=7,5$ e $b=237,3^\circ\text{C}$.

Na presença de gelo a tensão tem de ser calculada para a fase sólida, com $a=9,5$ e $b=265,5^\circ\text{C}$. Como a tensão para o gelo é menor do que para a água líquida, se as duas fases coexistirem as moléculas de água vão evaporando progressivamente do líquido e condensando a partir do gelo [7].

Esta equação fornece valores muito aceitáveis para as temperaturas atmosféricas correntes, sendo possível vislumbrar na figura 3.1 a pressão de saturação em função da temperatura e da temperatura.

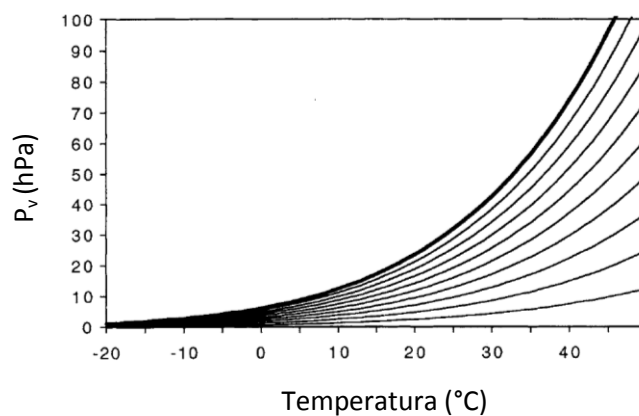


Figura 3.1 – Pressão de Saturação ($P_{v,sat}$) do vapor de água (linha mais grossa) e a pressão (P_v) do vapor de água para diferentes valores de umidade relativa. A linha mais grossa equivale a uma umidade relativa (H_r) de 100%. Escala linear [7]

3.3.2. Relação entre a mistura de ar seco e vapor de água

A proporção da mistura de ar húmido w (ar seco mais vapor de água) equivale ao quociente entre a massa de vapor de água m_v e a massa de ar seco m_a [7]:

$$w = \frac{m_v}{m_a} \quad (g/g) \quad (3.5)$$

Se P_v é a pressão parcial de vapor de água e p é a pressão atmosférica, então a pressão parcial do ar seco é dada por:

$$P_a = p - P_v \quad (3.6)$$

Sabendo que a equação dos gases perfeitos é dada por:

$$P_x \cdot V = m_x \cdot R_x \cdot T \quad (3.7)$$

sendo P_x a pressão parcial, m_x a massa actual, $R_x = R/M_x$, R a constante universal dos gases ($8,3169 \times 10^7 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), M_x a massa molar e T a temperatura absoluta em graus Kelvin.

Sabendo-se que $M_a = 28,965 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ e $M_v = 18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, obtém-se $R_a = 0,2870 \times 10^7 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ e $R_v = 0,4615 \times 10^7 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [7].

Substituindo a equação 3.5 na equação 3.6 obtém-se:

$$w = \frac{P_v \cdot R_a}{(p - P_v) \cdot R_v} = 0,622 \cdot \frac{P_v}{p - P_v} \approx 0,622 \cdot \frac{P_v}{p} \quad (3.8)$$

Como consequência, w pode ser considerado um valor característico, que é útil para identificar uma massa de ar e as suas trocas higrométricas com o meio ambiente. É um valor invariável quer a nível adiabático (sem troca de calor) ou diabático (com troca de calor) e isobárico ou não isobárico, para aquecimento e arrefecimento.

Este parâmetro é adimensional, e normalmente é apresentado em g/g, que representa as gramas de vapor de água misturadas por cada grama de ar seco. É também comum utilizar este valor em percentagem. No entanto, como este valor é muito pequeno, o mais comum é multiplicá-lo por 1000 passando-se a expressar em g/Kg, ou seja, a quantidade de gramas de vapor de água por cada quilograma de ar seco.

Como a pressão atmosférica é razoavelmente constante ($\pm 4\%$), torna-se prático substituir a variável p pelo valor 100000 Pa, simplificando-se os cálculos.

Para uma dada temperatura ambiente, o w aumenta proporcionalmente à massa de vapor emitida para a atmosfera até atingir o limite de saturação, ou seja, até a pressão de vapor de água P_v igualar a pressão de saturação $P_{v,sat}$ e a humidade relativa alcançar os 100% [7]. Em condições de saturação o w é indicado como w_{sat} , utilizando-se o $P_{v,sat}$ calculado pela equação 3.4.

Calculando o w_{sat} e medindo a humidade relativa torna-se possível determinar o valor real de w pela seguinte relação:

$$w = H_r \cdot w_{sat} \quad (3.9)$$

Este parâmetro é muito útil para fins de diagnóstico, pois fornece informações acerca da acção dos sistemas de climatização, caso existam, e interações entre o ar e as superfícies do meio envolvente.

Medindo este parâmetro ao longo de uma secção horizontal numa sala é possível observar a advecção de ar externo que entra pelas janelas, portas e fendas, a humidade libertada pelos visitantes ou as trocas de vapor de água entre o ar e as superfícies nas zonas de evaporação e de absorção.

Gradientes de w perto de uma superfície mostram que a esta está a efectuar trocas de vapor de água com a atmosfera. Se estiver a ocorrer um processo de evaporação, o ar nas suas imediações encontra-se rico em moléculas de água e o w naquela zona aumenta. Por outro lado, se a superfície estiver a adsorver moléculas de água, ou estiverem a ocorrer condensações, o ar está com uma pequena quantidade de moléculas de água, diminuindo assim o w naquela região.

Se uma superfície fria for colocada em contacto com o ar ambiente, inicialmente o ar em contacto com a superfície diminui a sua temperatura t , e o w permanece inalterado. Isto leva a humidade relativa H_r a subir. Quando começam os fenómenos de condensação, o w começa a diminuir e isso tende a inverter a tendência da humidade relativa H_r . Depois de algum tempo, o ar na proximidade da superfície é caracterizado por uma variação negativa de w , não se podendo dizer nada acerca do valor final de humidade relativa H_r , que é submetido a dois efeitos contrários devido à temperatura t e ao w . Normalmente o efeito térmico prevalece e a humidade relativa aumenta. Quando a parede é atingida por radiação solar directa aquece (aumento de t) e ocorre evaporação (aumenta o w).

Estes factos aparecem como um paradoxo quando indevidamente descritos: o ar fica mais seco na proximidade de uma superfície onde está a ocorrer condensação e mais húmido onde está a ocorrer evaporação. Isto deriva do facto de “mais seco” ou “mais húmido” não serem termos em função do w e em geral se associar o conceito de seco e húmido com o de humidade relativa.

A partir da definição, o ar é seco ou húmido em termos de w em consequência do seu conteúdo de vapor de água, independentemente da temperatura do sistema. Em termos de humidade relativa, significa o quão perto o vapor de água está da saturação, dependendo disso da temperatura t e de w . A parcela de ar “seco” em termos de w torna-se “húmido” em função da humidade relativa quando é suficientemente arrefecido; o ar “húmido” em função de w torna-se “seco” em função da humidade relativa quando suficientemente aquecido [7].

3.3.3. Concentração de vapor de água

A equação de estado (3.7) para o vapor de água pode ser escrita da seguinte forma [26]:

$$P_v = \frac{m_v}{V} \cdot R_v \cdot T = \nu \cdot R_v \cdot T \quad (3.10)$$

Pode-se definir a concentração de vapor de água v como a massa de vapor de água contida por unidade de volume de ar húmido [7], sendo expressa por:

$$v = \frac{m_v}{V} \quad (3.11)$$

A partir desta definição é possível constatar que v varia com m_v , isto é, depende da condensação, evaporação e da mistura com outras massas de ar, variando também com o volume V , dependendo da compressão e expansão, devido por exemplo à mudança de pressão atmosférica ou à variação da altitude. A partir da equação 3.10 também se pode constatar que v é directamente proporcional a P_v e inversamente proporcional à temperatura do ar T .

A concentração de vapor de água v , é expressa em g/cm^3 , mas de forma a facilitar a análise deste valor é comum utilizá-lo em g/m^3 , multiplicando-se v por 10^6 .

Através da equação 3.10 e considerando que a densidade do vapor de água é o inverso do volume específico V_v , obtém-se [7]:

$$v = \frac{1}{V_v} = \frac{1}{R_v} \cdot \frac{P_v}{T} = \frac{1}{R_v} \cdot \frac{P_v}{(273,15 + t)} \quad (3.12)$$

Para P_v expresso em Pascal (Pa), obtém-se a seguinte simplificação para a concentração de vapor de água expressa em g/m^3 [7]:

$$v = 2,2 \cdot \frac{P_v}{T} = 2,2 \cdot \frac{P_v}{273,15 + t} \quad (3.13)$$

Se ao invés de se utilizar a pressão de vapor de água P_v , se utilizar a pressão de vapor de água de saturação $P_{v,sat}$ obtém-se [7]:

$$v_{sat} = 2,2 \cdot \frac{P_{v,sat}}{T} = 2,2 \cdot \frac{P_{v,sat}}{273,15 + t} \approx 0,00806 \cdot P_{v,sat} \quad (3.14)$$

Sendo possível calcular o v real a partir do conhecimento do valor da humidade relativa H_r pela seguinte expressão:

$$v = v_{sat} \cdot H_r \quad (3.15)$$

3.3.4. Humidade absoluta

A humidade absoluta x_{ar} do ar húmido é a relação entre a massa de vapor de água m_v e a massa de ar húmido $m_a + m_v$. Esta relação representa a diluição ponderal do vapor de água na atmosfera [7], isto é:

$$x_{ar} = \frac{m_v}{m_a + m_v} \quad (\text{g/g}) \quad (3.16)$$

Substituindo a equação 3.16 na equação 3.5 obtém-se [7]:

$$x_{ar} = \frac{w}{1 + w} \quad (3.17)$$

Procedendo-se da mesma forma com a equação 3.8 obtém-se [7]:

$$x_{ar} = 0,622 \cdot \frac{P_v}{\rho - 0,378 \cdot P_v} \approx 0,622 \cdot \frac{P_v}{\rho} \quad (3.18)$$

Este parâmetro é adimensional e convencionalmente apresentado em g/g. Pode também ser apresentado em percentagem; contudo, a fim de evitar a utilização de números demasiado pequenos, a unidade mais utilizada é em g/Kg, multiplicando-se para isso x_{ar} por 1000, e representando-se então a massa de vapor de água em gramas contido em cada quilograma de ar húmido.

Pode-se calcular a humidade absoluta de saturação recorrendo à pressão de vapor de água de saturação [7]:

$$x_{ar} = 0,622 \cdot \frac{P_{v,sat}}{\rho} \quad (3.19)$$

Convertendo-se facilmente para o seu valor real caso se conheça o valor da humidade absoluta:

$$x_{ar} = x_{sat} \cdot H_r \quad (3.20)$$

3.3.5. Humidade relativa

O ar, gás fictício, comporta-se como uma mistura de gases e vapor de água que formam a atmosfera. Para descrever os fenómenos a si associados é feita uma distinção entre ar seco e ar húmido.

O adjectivo “seco” pode ter dois significados; o primeiro é literal, ou seja, sem vapor de água, e o segundo sem condensação, ou seja, a mistura comporta-se como um gás ideal sem mudança de fase. Similarmente “húmido” indica o oposto destas duas definições [7].

A humidade relativa traduz uma relação entre grandezas e, o que é talvez mais importante, configura um valor que por ser relativo é variável, mesmo que a humidade absoluta e concentração de vapor de água se mantenham constantes.

Originalmente a humidade relativa foi definida por [7]:

$$H_r = \frac{P_v}{P_{v,sat}} \quad (3.21)$$

Está-se perante uma relação adimensional entre a pressão parcial real de vapor de água e a pressão de saturação. Consoante se está acima ou abaixo (presença de gelo) dos 0°C, utilizam-se coeficientes diferentes para aferir a pressão de saturação, o que pode causar ambiguidades. Esta definição é eficaz para a maioria dos casos, mas perde rigor quando a humidade relativa se aproxima do seu limite superior. Quando nos aproximamos da saturação a pressão parcial de vapor de água afasta-se das condições ideais, devendo-se utilizar outra propriedade que não seja afectada. A fim de evitar este problema, a definição de humidade relativa foi reformulada: passou-se a processar em termos da massa de vapor de água contido na parcela de ar m_v , que é uma propriedade conservadora, utilizando-se para o quociente as equações 3.22 e 3.23 [7]:

$$P_v = \frac{m_v}{V} \cdot R_v \cdot T \quad (3.22)$$

$$P_{v,sat}(t) = \frac{m_{v,sat}}{V} \cdot R_v \cdot T \quad (3.23)$$

Sendo $m_{v,sat}$ a massa de vapor de água presente na fase de saturação.

A humidade relativa H_r é assim definida como a relação entre a massa de vapor de água m_v realmente presente em qualquer volume de ar e o máximo valor de água admissível para a mesma temperatura $m_{v,sat}$, ou seja:

$$H_r = \frac{m_v}{m_{v,sat}} \quad (3.24)$$

A equação 3.24 representa fisicamente o grau de saturação ao vapor de água [7]. A partir destas definições obtém-se:

$$H_r = \frac{P_v}{P_{v,sat}(t)} = \frac{m_v}{m_{v,sat}} = \frac{w_v}{w_{v,sat}} = \frac{\frac{m_v}{m_a}}{\frac{m_{v,sat}}{m_a}} = \frac{v}{v_{sat}} = \frac{\frac{m_v}{V}}{\frac{m_{v,sat}}{V}} \approx \frac{s_v}{s_{v,sat}} = \frac{\frac{m_v}{m_a + m_v}}{\frac{m_{v,sat}}{m_a + m_{v,sat}}} \quad (3.25)$$

Contudo, continua a ser prática corrente a utilização da equação 3.21. Esta equação possibilita ainda a aferição de que a humidade relativa depende não só da quantidade real de humidade m_v , mas também da temperatura, que actua de forma exponencial sobre o denominador.

Como a humidade relativa varia entre 0 e 1, é comum expressar este valor em percentagem, facilitando assim a sua compreensão.

Com a ajuda da equação 3.7, 3.24 e da equação de Magnus é possível obter fórmulas práticas para calcular o w e x_{ar} e v a partir de medições de H_r [7]:

$$w \approx x_{ar} \approx \frac{3795}{\rho} \cdot H_r \cdot 10^{a \cdot \frac{t}{b+t}} \approx 37,95 \cdot H_r \cdot 10^{a \cdot t/(b+t)} \quad (g/Kg) \quad (3.26)$$

$$P_v = 611 \cdot H_r \cdot 10^{a \cdot t/(b+t)} \quad (Pa) \quad (3.27)$$

$$v = \frac{1344 \cdot H_r \cdot 10^{a \cdot t / (b+t)}}{273,3 + t} \quad (g/m^3) \quad (3.28)$$

3.3.6. Temperatura do ponto de orvalho

A temperatura de ponto de orvalho, t_s , é outro termo capaz de expressar o estado higrométrico do ar, traduzindo de uma forma simples a noção de humidade em termos de temperatura.

A temperatura de ponto de orvalho corresponde à temperatura para que determinada parcela de ar atinge a saturação, podendo aparecer em função da temperatura t (em °C) e da humidade relativa H_r , ou em função da pressão de saturação do vapor de água [26].

Quando a temperatura real se aproxima da temperatura de ponto de orvalho constata-se que estamos próximo das condições de saturação.

Na equação 3.29 apresenta-se a fórmula de cálculo para a temperatura de ponto de orvalho em função da temperatura t e da humidade relativa H_r [26]:

$$t_s = \frac{237,3 \cdot \left(\ln(H_r) + \frac{17,269 \cdot t}{237,3 + t} \right)}{17,269 - \left(\ln(H_r) + \frac{17,269 \cdot t}{237,3 + t} \right)} \quad (3.29)$$

Apresenta-se de seguida a forma de cálculo em função da pressão de saturação de vapor de água $P_{v,sat}$ (Pa) para diferentes intervalos de pressão [26], resultantes da inversão da equação 3.4:

$$t_s = \frac{237,3 \cdot \ln\left(\frac{P_{v,sat}}{611}\right)}{17,269 - \ln\left(\frac{P_{v,sat}}{611}\right)} \quad \text{para } P_{v,sat} \geq 611 \text{ Pa} \quad (3.30)$$

$$t_s = \frac{265,5 \cdot \ln\left(\frac{P_{v,sat}}{611}\right)}{21,875 - \ln\left(\frac{P_{v,sat}}{611}\right)} \quad \text{para } P_{v,sat} < 611 \text{ Pa} \quad (3.31)$$

Através de observação directa da equação 3.29 e de uma forma indirecta das equações 3.30 e 3.31, verifica-se que a temperatura de ponto de orvalho depende directamente da temperatura, aumentando o limite de saturação com o aumento deste parâmetro. Percebe-se facilmente este conceito ao observar que num dado espaço com uma certa humidade absoluta ou concentração de vapor de água, ao aumentar a temperatura ambiente, aumenta-se consequentemente o limite de saturação. Como, por definição, a humidade relativa resulta do quociente destes dois termos, esta atingirá um novo valor inferior ao inicial. Analogamente é fácil compreender que caso a temperatura baixe para um valor de humidade absoluta constante, a humidade relativa vai aumentar.

3.3.7. Condensações superficiais

Como se viu nos pontos 3.3.5 e 3.3.6, uma massa de ar com humidade absoluta ou concentração de vapor de água constantes, ao sofrer uma diminuição de temperatura vai desencadear um aumento da humidade relativa, o que em certos casos pode conduzir à saturação. Estas condensações, quando se dão nos paramentos das paredes, nos tectos ou nos pavimentos, designam-se como condensações superficiais.

Para o caso dos edifícios correntes é importante ter este factor em consideração durante o Inverno, quando a temperatura das superfícies construtivas, mesmo que com isolamento térmico adequado, é mais baixa do que a do ar ambiente, podendo-se verificar em casos extremos a ocorrência de condensações [27].

No caso específico dos edifícios de grande inércia térmica, como as Igrejas, verifica-se um desfasamento importante entre as temperaturas do ar interior e exterior ao longo do dia e das estações, levando a que no seu interior as temperaturas sejam superiores no Inverno e inferiores no Verão. Isto, claro, se não estiverem aplicados sistemas de controlo do ambiente [18].

Quando a temperatura exterior começa a subir, em geral na Primavera, esse aumento não é acompanhado pelo ambiente interior nem pelas superfícies das paredes que mantêm as temperaturas a que se encontravam anteriormente.

Este acréscimo da temperatura do ar exterior é normalmente acompanhado por um aumento da humidade absoluta. Através da ventilação proporcionada por janelas, portas e outras aberturas, o ar quente e com uma determinada humidade relativa vai entrar no interior do edifício, onde vai arrefecendo progressivamente. Consequentemente, a sua humidade relativa vai aumentar, atingindo os valores mais altos junto dos paramentos das superfícies de grande massa, que por norma têm uma temperatura inferior à do ar durante a Primavera. Este incremento de humidade relativa junto às paredes, que apresentam temperatura mais baixa do que o ar ambiente, podem conduzir à condensação caso se atinja o limite de saturação [27].

De forma a compreender estes fenómenos mais facilmente, considere-se como exemplo um edifício de elevada inércia térmica, cuja temperatura interior é de 15°C, sendo 13°C nos paramentos das paredes. Admita-se um dia de Primavera caracterizado por uma temperatura de 20°C e uma humidade relativa de 70%. Quando o ar exterior é transportado para o interior e arrefece até aos 15°C, a sua humidade relativa aumenta para os 95%. Se a superfície da parede estiver a 13°C, esse ar atinge o limite de saturação, dando origem a condensações. Refira-se que neste exemplo não se considerou qualquer fonte de vapor de água no interior, algo que é por exemplo característico das Igrejas com a presença de pessoas, a qual a existir agravaria ainda mais os fenómenos mencionados.

Existe ainda o caso das paredes enterradas, que devido à humidade proveniente do terreno, pode desencadear processos de humidade ascensional na parede e o aumento do seu teor em água. Este acréscimo provoca a diminuição da resistência térmica da parede, a qual associada ao decréscimo da temperatura superficial exterior provocado pela evaporação da água pode levar à ocorrência de condensações superficiais. As humidades verificadas nestas paredes, em vários casos, também

podem ser justificadas pela infiltração de água da chuva ou outro tipo de humidade presente no terreno [18,27].

3.3.8. Representação gráfica

É possível relacionar a concentração de vapor de água, humidade relativa e temperatura do ar através de um diagrama específico, designado por diagrama psicométrico, como se apresenta na figura 3.2. Este diagrama permite entender mais facilmente os conceitos referidos anteriormente, apresentando em abcissas os valores da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), em ordenadas os valores da concentração de vapor de água (g/m^3) e da pressão de saturação (em Pa) e um conjunto de curvas de humidade relativa (em %). As linhas horizontais representam pontos com igual concentração de vapor de água e as verticais pontos com igual temperatura; cada uma das curvas do diagrama é constituída por pontos de igual humidade relativa.

Veja-se por exemplo uma massa de ar interior com uma temperatura de 15°C e uma humidade relativa de 70%. Nas ordenadas consegue-se retirar a concentração de vapor de água que equivale a $12 \text{ g}/\text{m}^3$. Traçando uma linha horizontal do ponto anterior até à curva da humidade relativa equivalente a 100% (limite de saturação) conclui-se que a temperatura do ponto de orvalho equivale a 14°C , mostrando-se que uma variação negativa de 6°C conduziria à condensação.

A utilização do diagrama psicométrico permite uma análise rápida dos principais parâmetros higrotérmicos com uma exactidão aceitável, facilitando a percepção destes fenómenos e a verificação dos riscos de condensação.

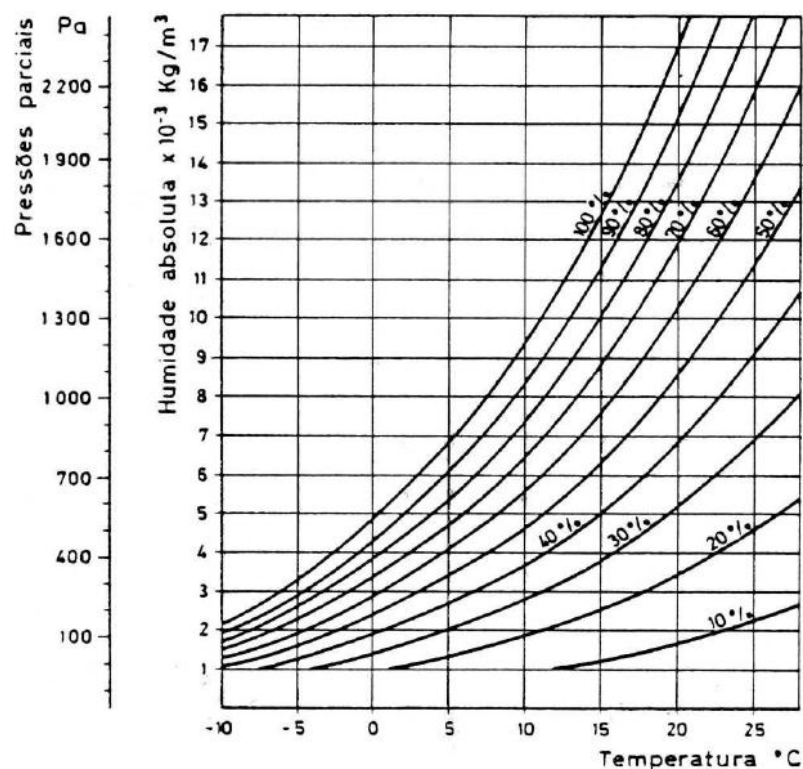


Figura 3.2 – Diagrama Psicométrico [26]

3.4. Adsorção

Um corpo poroso colocado num ambiente com vapor de água, qualquer que seja a humidade relativa, retém alguma dessa água sob a forma líquida. Designa-se por adsorção o processo espontâneo de adesão física ou de ligação de moléculas que ocorre sempre que uma superfície sólida é exposta a um gás ou a um líquido, dependendo da temperatura, da pressão e da área de superfície. Este conceito não deve ser confundido com a absorção que corresponde à migração de água líquida no interior dos poros. De forma simplificada, pode-se dizer que a adsorção ocorre na superfície, enquanto na absorção se desenvolve no interior da estrutura [19].

Um material típico de construção com porosidade aberta apresenta uma crescente adsorção proporcional ao aumento de humidade relativa. Este efeito é potenciado de forma drástica se o material tiver sais higroscópicos no seu interior, tais como cloretos ou nitratos, que têm a capacidade de adsorver grandes quantidades de vapor de água, alterando por esse facto o comportamento típico do material em que se encontrem.

Os fenómenos de adsorção são naturalmente complementados por fenómenos inversos de perda de água quando a humidade relativa diminui, designados por desadsorção. Em condições ideais, a desadsorção apresentaria uma boa correspondência com a adsorção. No entanto, tal não se verifica em muitos dos materiais utilizados na construção, nos quais a desadsorção é bastante mais lenta que a adsorção.

Verifica-se assim uma diferença de comportamento entre as fases, designada por histeresis. Na generalidade dos materiais com base em ligantes minerais, como por exemplo os betões e argamassas, a histerese é bastante acentuada, como se mostra na figura 3.3.

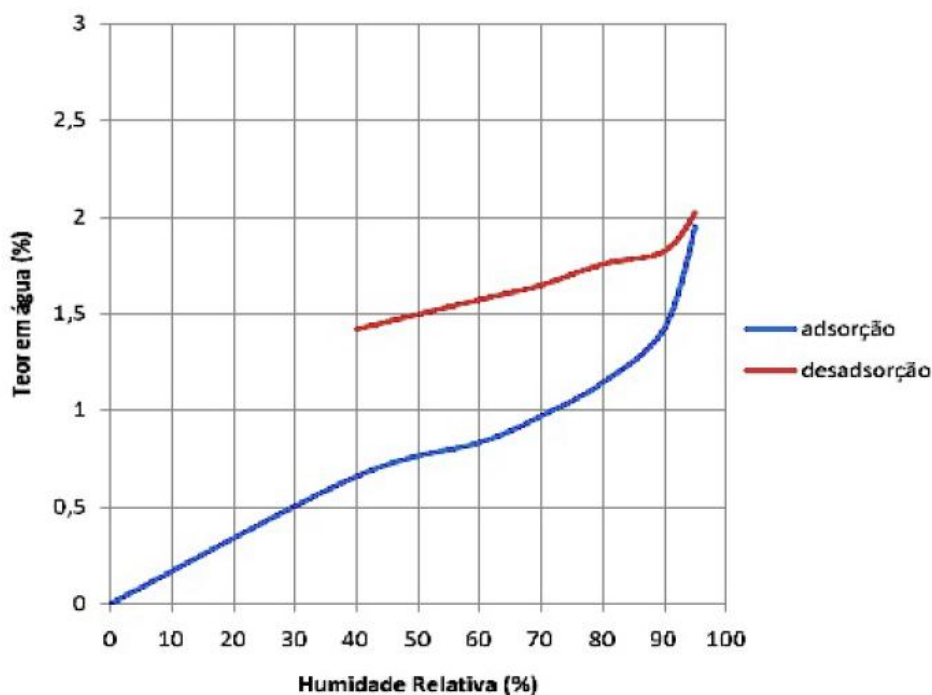


Figura 3.3 – Exemplo de histerese em materiais de origem mineral [19]

Por outro lado, em materiais de outros tipos como madeiras e certos tipos de pedras o efeito da histerese é praticamente nulo e como tal negligenciável, como se observa na figura 3.4.

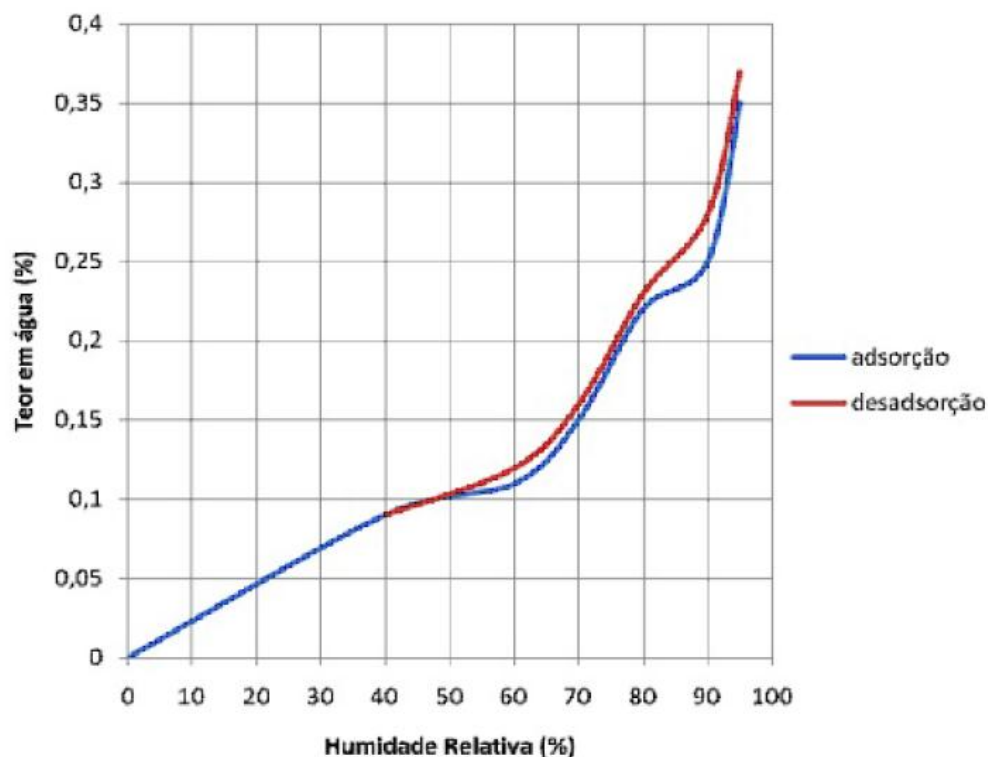


Figura 3.4 – Histerese negligenciável (rocha calcária) [19]

Esta diferença de comportamento entre as fases de adsorção e desadsorção pode ser explicável por diversos mecanismos, dando-se principal atenção ao formato dos poros. Em materiais à base de ligantes hidráulicos predominam os poros largos e com uma zona estreita de ligação ao poro adjacente, dificultando a evaporação da água, resultando assim um decréscimo de teor de humidade muito mais lento.

O estudo destes fenómenos torna-se importante pois o acréscimo do teor de água nos materiais de construção leva a uma perda de resistência térmica, conduzindo a uma diminuição da temperatura que pode acelerar o processo de condensação.

4. Processos de degradação associados à temperatura e humidade

4.1. Mecanismos de degradação por temperatura

A temperatura é um factor de grande importância para a conservação de obras de arte. A sua variação pode induzir expansões diferenciais nos materiais e forças de tracção entre as várias camadas, superficiais e mais profundas [6].

A presença de ciclos acentuados de temperatura provoca mecanismos de desgaste e acelera a falha por fadiga em materiais mais sensíveis. Ciclos mais rápidos aumentam a interacção entre as várias camadas dos artefactos, e apesar destas servirem como filtros que atenuam a passagem do gradiente para as camadas interiores, não evitam a variação nas camadas mais superficiais que, regra geral, é onde se encontra o verdadeiro valor dos monumentos e artefactos. É assim fácil verificar que os ciclos diários de temperatura assumem um papel mais importante que os sazonais, dada a maior velocidade com que atingem as camadas superficiais [7].

Os ciclos térmicos podem causar a desagregação mecânica da camada superficial de rochas ornamentais e estruturais, começando nas descontinuidades superficiais e nas interfaces dos diferentes minerais que as formam. Mecanismos de expansão e retracção também podem assumir um papel preponderante nas estruturas, tendo principal foco quando estas têm uma constituição mais complexa e apresentam partes com diferentes coeficientes de dilatação e sujeitas a importantes amplitudes térmicas, contribuindo para a fadiga e desagregação dos materiais.

As variações de temperatura também podem alterar o grau de saturação de vapor de água e a quantidade de água adsorvida pelo material, alterando a sua humidade relativa e conduzindo assim a alterações dimensionais e ao aumento do nível de fragilidade em determinados materiais, como o pergaminho, a madeira, o marfim e o gesso. Verifica-se que um aumento de temperatura de 15°C para 20°C, por exemplo, pode acelerar a taxa de corrosão da celulose em aproximadamente 250% (em ambiente escuro e com humidade relativa estável) [56].

O superaquecimento dos materiais devido à incidência directa da radiação solar também pode provocar a desagregação de materiais granulares ou cristalinos com os minerais orientados de forma diferente ou com diferentes coeficientes de dilatação, como o granito ou o mármore, provocando falhas por fadiga. Isto deve-se ao facto de a radiação solar directa provocar choques térmicos muito fortes, que ocorrem com o aparecimento e desaparecimento do sol, que também são condicionados pela velocidade do vento e nebulosidade, provocando ciclos térmicos muito rápidos que podem ir de 3 a 15 minutos.

A temperatura do ar pode ser também vista como um importante factor para o desenvolvimento de vida biológica. Para temperaturas inferiores a 20°C os processos metabólicos são reduzidos e a biodegradação pode ser facilmente evitada com uma escolha apropriada de outros factores, como a humidade relativa, iluminação e ventilação. Contudo, é necessário ter cuidados redobrados para

gamas de temperatura entre os 20 e 30°C, que favorecem o aparecimento de microorganismos que podem ter um efeito nefasto em diversos materiais. Estes microorganismos podem ter um impacto não só visual, mas também alterar vários parâmetros como a capacidade das superfícies adsorverem e desadsorverem vapor de água e, consequentemente, aumentar o teor em água e facilitar o aparecimento de condensações, para além de outro conjunto de alterações estruturais mais complexas. Note-se que um aumento de 5°C pode aumentar a taxa dos movimentos de água nos materiais e artefactos em 30% [56].

A temperatura assume ainda um papel preponderante para o desenvolvimento de correntes convectivas, como se viu nas secções 2.3 e 3.2. É imperativo que a temperatura do tecto seja igual ou superior à do restante ambiente, sob pena de se destruir a estratificação do ar e originar movimentos convectivos, muitas vezes associados a movimentos do ar que entra pelas janelas, portas e outras aberturas, que podem ter um efeito negativo para a conservação dos materiais, provocando o movimento e depósito de partículas de sujidade [10].

4.2. Mecanismos de degradação por humidade

É sabido que níveis elevados de humidade relativa aumentam as taxas de degradação de vários materiais. Thomson (1986) elaborou uma lista de alguns dos mais importantes fenómenos na conservação, podendo também ser encontrados outros estudos. A fim de esclarecer a acção operada pela humidade, é útil resumir alguns mecanismos chave da água em alguns materiais [7].

Pedras, materiais cerâmicos, gesso, frescos e outros materiais com sais solúveis em água nos poros são sensíveis às alterações do microclima. Condições ambientais que conduzam a ciclos de humidade relativa podem gerar cristalização e dissolução de sais por intermédio de dois mecanismos principais:

- a) A evaporação da água, que é controlada pela humidade relativa, provoca uma concentração de soluto e saturação e precipitação de cristais de sal;
- b) Sais higroscópicos, que estão em forma cristalina apenas em ambiente seco, tornam-se deliquescentes e precipitam com os ciclos de humidade relativa.

Estes dois mecanismos geram danos mecânicos cumulativos, como eflorescências, subflorescências, laminação, fragmentação e descamação [7].

Apresentam-se abaixo os processos de degradação devida à humidade para os metais, vidro, madeira, papel e têxteis.

A corrosão é o resultado destrutivo de uma reacção química entre o metal e o meio ambiente e, portanto, inclui também a oxidação, que é a primeira forma de deterioração do metal. A corrosão metálica envolve a transferência de cargas electrónicas em solução aquosa. Por esta razão, na presença de água os metais tendem-se a combinar com outros compostos químicos e retornam a uma forma semelhante à dos minerais a partir dos quais foram extraídos, libertando a energia necessária aquando da sua extracção [7].

Para o vidro a situação é mais complexa, pois existem vários mecanismos de deterioração. Soluções químicas podem provocar alterações na sua superfície, que se podem espalhar por todo o vidro. A

água gerada por condensações ou trazida pela chuva, ou simplesmente por adsorção de vapor, é necessária para a substituição dos prótons na difusão de íons alcalinos e consequente hidratação da cadeia de sílica. As moléculas de água podem-se difundir por lixiviação através de pequenas fendas, actuando sobre os carbonatos de sódio e potássio que são deliquescentes, causando trocas iónicas e extracção de metais alcalinos. Em ambiente seco ou sob a acção da radiação solar, a perda de água absorvida provoca a desidratação. Por esta razão os ciclos de humidade relativa são perigosos, mesmo na ausência de poluição [7].

Madeira e papel são compostos principalmente por cadeias de celulose que são formadas a partir de moléculas de glicose. Cada unidade de glicose possui três grupos de hidroxila, que têm afinidade com a água. Quando a água é absorvida é retida entre as cadeias de celulose, o que faz com que o material aumente as suas dimensões e diminua a força para a atenuação dos limites de hidrogénio e das forças intermoleculares de Van der Waals, podendo originar o aparecimento de fendas de tração quando o material está sujeito a ciclos repetidos de humidade relativa. A segunda consequência é a hidrólise lenta, mas progressiva de celulose que é produzida, o que vai romper as ligações entre as unidades de glicose, quebrando a cadeia de celulose em várias cadeias mais pequenas e mais fracas com um mecanismo de despolimerização. A terceira consequência é a oxidação ou degradação química, especialmente no papel moderno (após meados do século XIX), que é feito a partir de polpa de madeira e contém vários elementos ácidos. O dano é particularmente grave na presença de poluentes atmosféricos, em especial de ozono. Além disso, quando o papel é armazenado em ambientes húmidos liberta ácido sulfúrico que acelera a sua deterioração. A última consequência, mas não menos importante é a biodeterioração [7].

A falta de humidade também afecta a estrutura molecular do papel. O papel tem uma estrutura que é mais fraca em comparação com a madeira e mais sensível a variações de humidade. Um ambiente moderado frio e seco é melhor para o armazenamento e conservação, mas torna o papel quebradiço. Uma humidade moderada possibilita a absorção de moléculas de água que vão assegurar a mobilidade das cadeias de celulose e consequentemente o aumento da flexibilidade. Esta condição ambiental é mais adequada para o manuseamento de papel. Na literatura encontram-se vários valores sugeridos para a humidade ideal, como por exemplo o intervalo de 45 a 65% [7,12].

A água pode também ser absorvida por têxteis (algodão, linho, lã e seda) enfraquecendo o material e podendo contribuir para o seu apodrecimento.

Para todos os materiais o microclima deve ser especialmente escolhido de modo a reduzir ou eliminar o risco de ataque biológico por fungos, bactérias ou outros parasitas. Por exemplo, as algas e cianobactérias precisam de humidades superiores a 65%, mas em materiais já contaminados deve ser considerado que os microorganismos podem sobreviver para níveis acima de 50%. Elevados níveis de humidade relativa, especialmente quando associados a temperaturas superiores a 20°C favorecem o apodrecimento, especialmente no caso de materiais orgânicos, cuja composição é apreciada por parasitas ou quando oferecem um bom substrato para o desenvolvimento de vida microbiológica [7].

4.3. Condições ideais para a conservação

No passado, o clima local era cuidadosamente estudado de forma a construírem-se edifícios que se adaptassem, criando-se um microclima natural. Construíam-se os edifícios respeitando a orientação solar, a predominância do vento e precipitação, sendo a sua implantação função da temperatura e quantidade de luz pretendida.

Actualmente com o desenvolvimento de novas tecnologias, muitas vezes pensa-se que se podem ignorar as variáveis ambientais externas, através da criação de microclimas artificiais com recurso a sensores avançados e microprocessadores capazes de controlar a temperatura e a humidade do edifício. Edifícios comerciais e museus são mantidos com uma pressão interna superior à exterior, o que reduz as infiltrações de ar externo e poluentes. Isto, contudo, cria uma atmosfera interna com um microclima artificial, que normalmente não se encontra em equilíbrio com as paredes, pavimentos, tectos e objectos internos, necessitando ainda de transferências frequentes de calor e humidade para equilibrar a influência das pessoas, as fugas de ar e as trocas entre o ambiente e as superfícies. Torna-se assim imperativo que antes de se proceder a qualquer alteração se efectue um estudo rigoroso no microclima actual e passado de modo a compreender toda a sua evolução e a forma como a sua envolvente se adaptou.

Apesar disto, começa-se a ter uma nova preocupação com a manutenção do microclima, principalmente nos edifícios de relevo histórico, tendo-se verificado uma evolução na abordagem efectuada, deixando-se a preocupação principal para com o conforto dos visitantes e passando-se a dar especial atenção aos parâmetros ambientais de modo a precaver o bom estado de conservação dos bens culturais, tentando-se manter um microclima constante, com ciclos de pequenas amplitudes [14,56].

Tem sido claramente visto que alguns níveis de humidade são, com frequência, associados a mecanismos de deterioração específicos, ou pelo menos como um factor acelerante. As moléculas de água que são absorvidas pelo material podem provocar tensões internas e algumas deformações na estrutura. A quantidade de água absorvida está em equilíbrio com a humidade relativa e também com a temperatura, apesar de em menor grau. Essas deformações tendem a ser reversíveis em plásticos e materiais novos, mas irreversíveis e extremamente perigosas em materiais mais antigos.

Vários especialistas têm-se debruçado sobre a determinação de valores aconselháveis para a boa conservação de diversos materiais, sendo possível encontrar vários valores tabelados na literatura. É comum encontrar intervalos limite para temperatura e humidade relativa com o intuito de adequar o ambiente às necessidades conservativas dos materiais.

Têm sido avançados vários números para a manutenção de um microclima confortável para a correcta conservação de materiais e artefactos, desde a regra dos 60/60, que dizia que os valores ideais seriam 60°F (15°C) de temperatura e 60% de humidade relativa, para qualquer tipo de artefacto, independentemente da sua localização. Esta regra tem limitações claras, tendo-se avançado a partir daqui com novos estudos e o aparecimento de novos valores.

Garry Thomson surge como o autor mais citado, propondo um valor médio de 55% para a humidade relativa, com limite superior entre 65 e 70 % para evitar a formação de fungos e bolores e um limite

inferior entre 40 e 45 %, para manter a humidade relativa estável de forma a evitar fendas e deformações. Para a temperatura, exceptuando o armazenamento a longo prazo, o autor sugere que o valor ideal se prende ao que gera o conforto humano, com amplitudes máximas de 10°C [21].

Mais recentemente, Sarmiento (2003) sugere valores entre os 18 e 22°C para a temperatura e entre os 45 e 55 % para a humidade relativa, enquanto Mello (et al, 2004) avança um intervalo entre os 19 e 23°C para a temperatura e entre os 50 e 60 % para a humidade relativa [12].

É oportuno sublinhar que os valores recomendados de temperatura e humidade relativa para determinados materiais podem não o ser para artefactos antigos construídos com esses mesmos materiais. Isto prende-se com o facto desses artefactos, que se mantiveram durante séculos sob determinadas condições terem evoluído para se adaptarem, podendo ter ocorrido o desenvolvimento de falhas ou mesmo fracturas, encontrando-se sujeitos a tensões internas, o que eventualmente os conduziu a novos equilíbrios com deformações permanentes. Se um artefacto antigo se adaptou a determinado ambiente de acordo com o campo interno de tensões passado, e perdeu a sua elasticidade inicial é incapaz de se adaptar novamente a um microclima distinto. Por esta razão é necessário um conhecimento preciso das condições passadas, devendo-se manter o microclima; no caso de ser necessária a sua alteração, esta deverá processar-se de forma lenta e gradual, sendo partilhada por diversos autores a opinião de que a alteração do microclima e a exposição a ciclos de elevadas amplitudes podem causar danos irreversíveis aos materiais [3,4].

As alterações sazonais, embora tenham uma maior amplitude, são menos perigosas, visto ocorrerem de forma lenta e num período de tempo muito mais longo do que o tempo de relaxamento do objecto, e com uma taxa mais lenta do que a penetração do calor e humidade no material. Deste modo, não provocam tensões significativas entre as várias camadas do objecto. No entanto, também estas alterações podem ser perigosas no caso de materiais não homogéneos [7].

Nas secções 4.1 e 4.2 adiantaram-se alguns valores de referência, sendo contudo de salientar que a manutenção de um microclima estável não se deve encontrar unicamente dependente deles, é necessário um profundo conhecimento da evolução do microclima de modo a evitar a criação de danos indesejáveis. É contudo incontestável que, seja qual for a medida adoptada para corrigir algum parâmetro, a atenuação dos ciclos, principalmente os diários, toma uma importância fulcral, devendo-se manter os ciclos predominantes no local de estudo ao longo dos tempos, pois os diversos materiais foram respondendo com falhas e outras transformações. Considera-se que em ciclos sustentáveis para a conservação podem ocorrer variações diárias de 3,2°C para a temperatura e 7% para a humidade relativa. Quando as variações atingem o dobro destes valores atingem-se zonas de perigo [10].

Para o caso dos edifícios antigos, onde não se opere o controlo do clima de forma mecânica, a sua elevada inércia térmica, conferida pela grande espessura e massa das paredes, ajuda a diminuir as flutuações de temperatura e humidade relativa no seu interior, contribuindo para um microclima natural, estável e adequado [61].

5. Metodologia

5.1. Descrição do edifício

O corrente estudo desenvolveu-se na Igreja de São Cristóvão, situada na freguesia de São Cristóvão e São Lourenço, concelho e distrito de Lisboa. Localiza-se no topo das Escadinhas de São Cristóvão, na rua do Regedor, na área da encosta do Castelo de São Jorge, como se pode observar na figura 5.1.

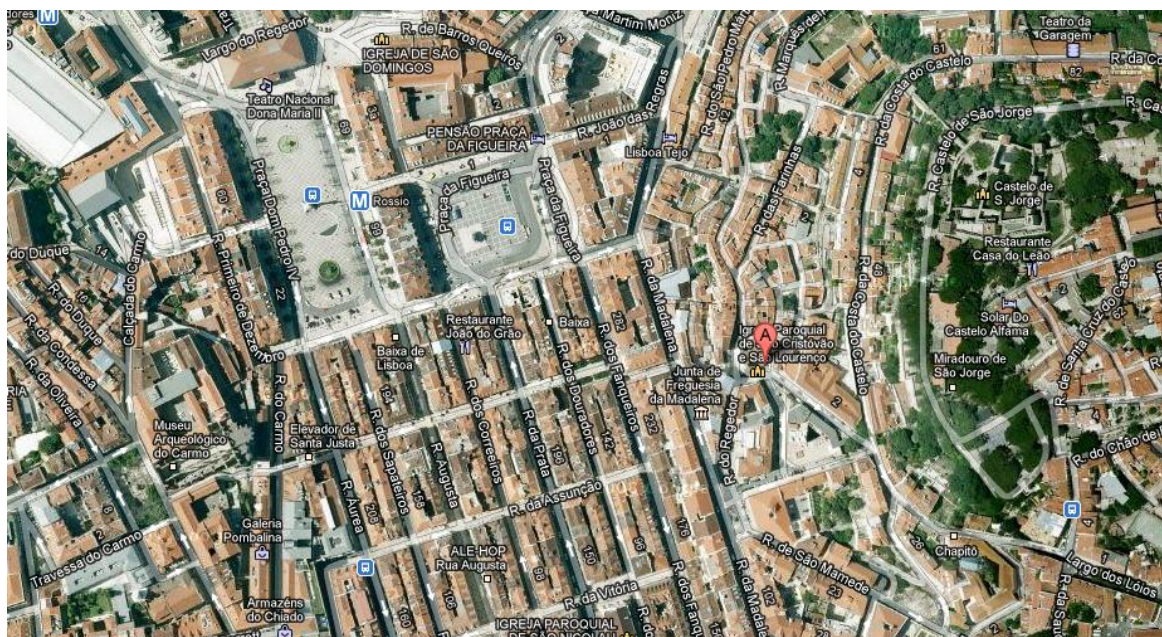


Figura 5.1 – Localização da Igreja de São Cristóvão [fonte: Google Maps – Novembro de 2011]

A localização da Igreja de São Cristóvão é conhecida desde o primeiro quadril do século XIII, tendo sido construída em honra de Santa Maria de Alcamim durante a ocupação árabe. Mais tarde, entre o final do século XIII e início do século XIV, depois da reconquista cristã, terá passado a denominar-se como Igreja de S. Cristóvão [54]. A Igreja terá permanecido com a sua configuração original até ao século XVI, altura em que ficou muito destruída pela ocorrência de um incêndio, durante o reinado de D. Manuel I. Entre 1610 e 1672 processaram-se importantes obras de restauro, implementando-se profundas alterações face à estrutura original. O projecto arquitectónico foi desenvolvido pelo Padre João Duarte [13].

Este monumento apresenta-se como um dos poucos que se situam na zona central de Lisboa e que resistiram com poucos danos ao terramoto de 1755, apenas com a ocorrência de alguns estragos na torre sineira [20].

A sua fachada apresenta um estilo Barroco-Maneirista, típico do século XVII, seguindo uma linha denominada como “estilo chão”, verificando-se uma clara tendência para o despojamento decorativo, que produz uma arquitectura austera, ordenada, proporcionada e simples, com um

portal no centro, com um nicho com a imagem de São Cristóvão por cima e duas torres sineiras, sendo constituída por espessas paredes estruturais de pedra [51,54].

O interior da Igreja apresenta uma só nave rectangular, com uma área de 144 m², e uma altura de 13 m na zona central, com tecto plano ao centro e paredes e tectos revestidos de painéis emoldurados com talha dourada [49]. Constituída por cinco nichos de altares, dois púlpitos, um coro e o altar-mor, apresenta também a sacristia a norte da nave central e a casa mortuária a sul, como se pode verificar na planta e corte da Igreja presentes nas figuras 5.2 e 5.3, respectivamente. A Igreja tem ainda um coro elevado, com acesso pela casa mortuária e um piso superior com varandas e janelas, que possibilitam a entrada de ar e radiação solar. Nas figuras 5.4 e 5.5 apresentam-se fotografias do interior e exterior da Igreja, respectivamente.

No que respeita à sua estrutura, a Igreja de São Cristóvão apresenta paredes espessas e revestidas por pedra calcária, tecto plano em madeira na nave principal e tecto em abóbada de berço constituída por alvenaria estucada e dividida em 8 quartos por nervuras de pedra para o altar-mor. Quando à cobertura, observa-se a presença de telhado de duas águas a cobrir a nave principal e de quatro águas para a sacristia, casa mortuária e altar-mor. A cobertura é constituída por telha cerâmica e estrutura em madeira, com a presença de um desvão acessível para a nave principal [54].

Note-se ainda que as plantas existentes, como referenciadas, foram obtidas sem escala e em desenho antigo, tendo-se desenhado em formato digital e colocado à escala, através de medições no local, durante a realização deste trabalho.

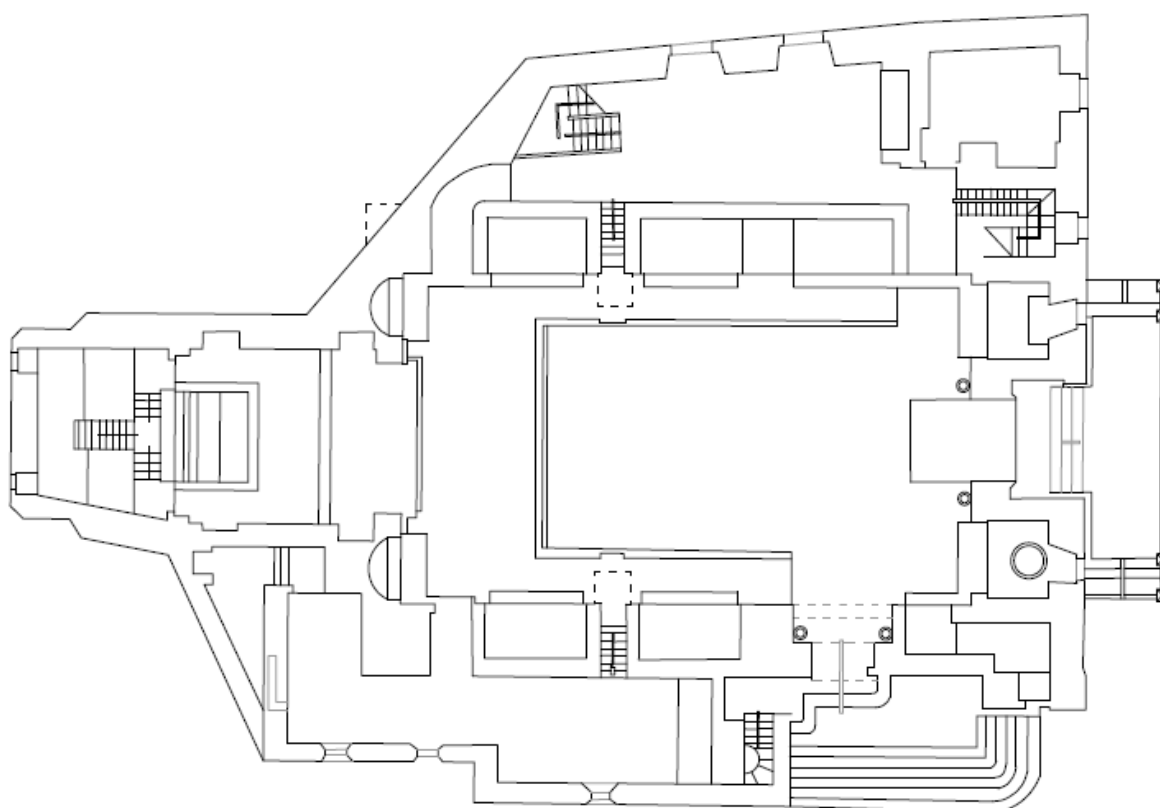


Figura 5.2 – Planta da Igreja de São Cristóvão (sem escala) [55]



Figura 5.3 – Corte longitudinal de Igreja de São Cristóvão (sem escala) [55]



Figura 5.4 – Igreja de São Cristóvão, 1944 [20]



Figura 5.5 – Interior da Igreja de São Cristóvão

5.2. Definição geral do clima em Lisboa

A localização de Lisboa, com uma latitude a sul, confere-lhe um clima semelhante ao dos países mediterrânicos (segundo a classificação de Köppen), com temperaturas mais amenas devido à sua proximidade do oceano Atlântico, evitando um clima excessivamente quente no Verão e frio no Inverno. Lisboa pode ser descrita como uma cidade muito ensolarada, com cerca de 260 dias de sol por ano e pela concentração da maior parte da precipitação no período decorrente entre Outubro e Abril [59].

Lisboa caracteriza-se por uma temperatura média anual da ordem dos 17°C, com mínimos a ocorrerem durante os meses de Novembro a Março e máximos nos meses de Abril a Outubro, aparecendo Julho e Agosto como os meses mais quentes.

Em termos de precipitação, regista-se um valor médio anual de 725,8 mm, de acordo com a normal climatológica de 1971/2000, verificando-se o maior valor no mês de Dezembro, com 121,8 mm e o valor mais baixo no mês de Julho, com 6,1 mm [1].

Relativamente aos ventos, verifica-se uma predominância no quadrante norte, embora os rumos noroeste e nordeste também sejam representativos [16].

Na figura 5.6 apresenta-se a evolução das temperaturas médias ao longo do ano segundo a normal climatológica de 1971-2000, onde TA representa a média das temperaturas máximas, TI a média das temperaturas mínimas, TMA a temperatura máxima verificada e TMI a temperatura mínima ocorrida.

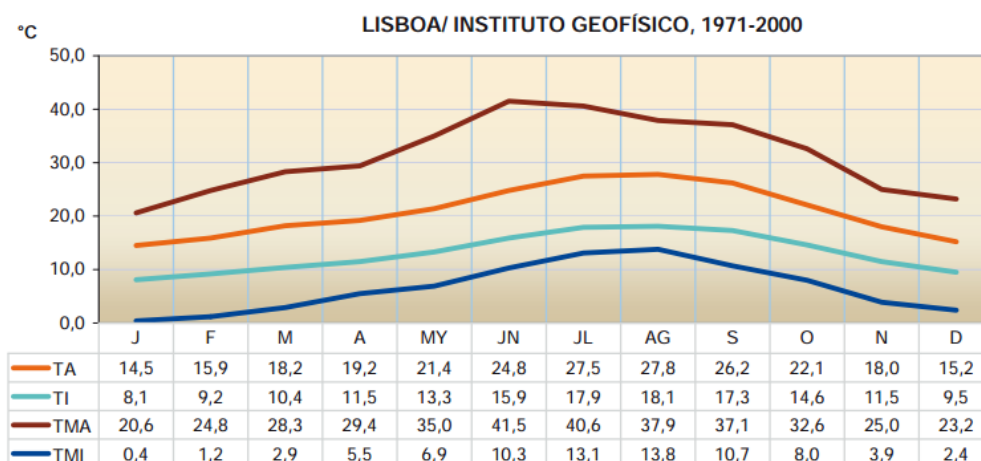


Figura 5.6 - Evolução das temperaturas mensais segundo a normal climatológica de 1971-2000 [1]

Na figura 5.7 apresenta-se a evolução da precipitação média mensal ao longo do ano segundo a normal climatológica de 1971-2000, onde P é a média da precipitação total mensal e PM o valor máximo da precipitação diária.

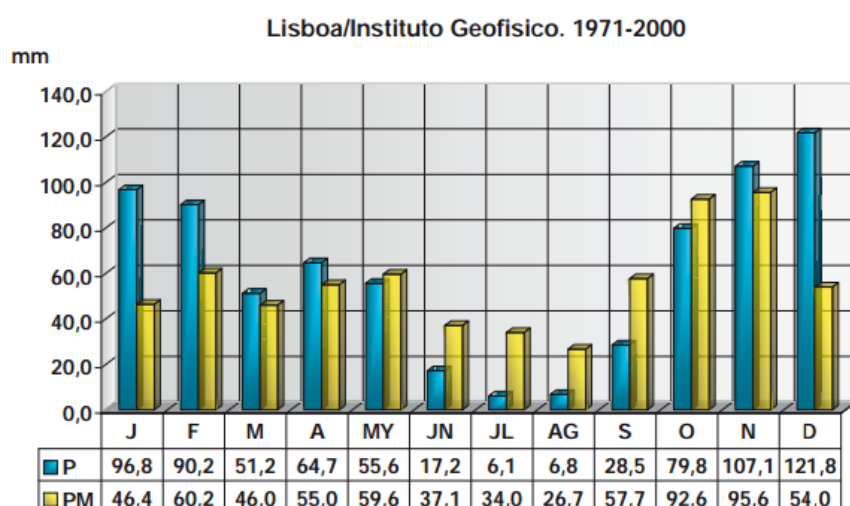


Figura 5.7 - Evolução da precipitação mensal segundo a normal climatológica de 1971-2000 [1]

Da análise das figuras 5.6 e 5.7 pode-se observar que Lisboa apresenta Invernos e Outonos com elevados valores de precipitação, principalmente nos meses compreendidos entre Outubro e Fevereiro, verificando-se uma precipitação conjunta de 495,7 mm. Relativamente à temperatura, esta pode variar entre os 8°C e os 15°C.

Na Primavera atingem-se valores médios de temperaturas mínimas de 10°C e máximas de 22°C, presenciando-se a muitos dias de sol apesar da existência de alguns aguaceiros, principalmente no mês de Abril.

No Verão as temperaturas sobem, principalmente nos meses de Julho e Agosto, que aparecem como meses bastante ensolarados, quentes e secos, com uma temperatura máxima média de 28°C, podendo atingir picos de 35°C. Nesta altura as precipitações são reduzidas, ocorrendo valores

mínimos de 6,1 e 6,8 mm para os meses de Julho e Agosto, respectivamente. Setembro apresenta-se como um mês mais frio, finalizando a estação, continuando a apresentar uma precipitação reduzida.

No que se refere à humidade relativa, pode-se observar na figura 5.8 a sua revolução, juntamente com a temperatura segundo a normal climatológica de 1951-1980, permitindo ter uma ideia sobre os valores médios para cada mês.

As barras da esquerda e da direita representam, respectivamente, a temperatura máxima e mínima. A linha vermelha representa a humidade relativa medida às 9:00 h e a linha azul a humidade relativa medida às 18:00 h. Verificam-se os valores máximos de humidade relativa para os meses de Inverno, com valores acima dos 80%, e os mínimos para os meses de Verão, com valores da ordem dos 65% para os meses de Julho e Agosto. Estes valores são referentes às medições efectuadas às 9:00 h.

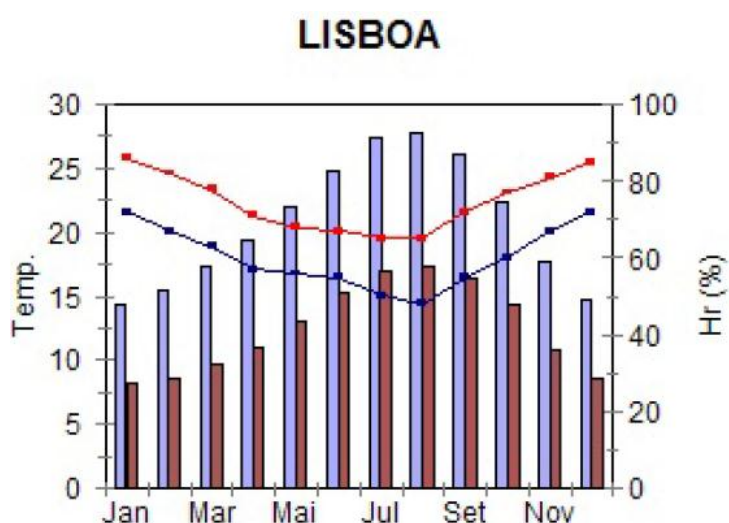


Figura 5.8 – Temperaturas e humidades relativas segundo a normal climatológica de 1951-1980 [26]

Apresentam-se agora alguns dados referentes aos últimos três anos para os meses de Novembro, Dezembro, Janeiro, Fevereiro, Março e Abril, de modo a contextualizar os valores obtidos durante o presente estudo.

Em 2010 verificaram-se médias mínimas e máximas de temperatura superiores à normal, tal como os valores de precipitação, tendo-se atingido um valor de 1598 mm em Lisboa, o valor mais elevado desde 1870. O mês de Fevereiro de 2010 foi o mais chuvoso dos últimos 24 anos. A precipitação acumulada no Inverno foi a mais elevada desde que existem registos em Lisboa, tendo-se também verificado a Primavera mais chuvosa dos últimos 51 anos [29].

Em 2011 as médias de temperatura voltaram a superar o valor da normal; contudo, o valor da precipitação foi mais baixo. Apesar do mês de Novembro ter superado a normal em 48,9 mm, o mês de Dezembro apresentou um total mensal muito inferior, tendo-se começado a verificar o risco de seca [30].

Nos primeiros dois meses de 2012 manteve-se a tendência de seca, com os meses de Janeiro e Fevereiro a qualificarem-se como muito secos a extremamente secos, com valores de precipitação muito inferiores à normal de 1971-2000. Verificaram-se ainda valores médios de temperatura

mínima inferiores à normal, especialmente no mês de Fevereiro. O mês de Março iniciou-se a confirmar a tendência, tendo contudo equilibrado os valores de precipitação nos seus últimos dias, classificando-se assim como um mês normal e mostrando ainda médias de temperaturas máximas e mínimas superiores ao valor da normal. Em Abril continuou-se a verificar a tendência deixada no final do mês de Março, no entanto continuaram a registar-se os valores mais baixos de precipitação dos últimos três anos. Nota-se ainda que foi um mês com valores médios, mínimos e máximos de temperatura abaixo dos verificados nos últimos três anos e da normal climatológica [45-48].

O presente estudo desenvolveu-se de Novembro de 2011 a Abril de 2012, pelo que se torna interessante a análise dos dados presentes nas figuras 5.9 e 5.10. Na figura 5.9 comparam-se os valores das temperaturas máximas e mínimas dos meses de Novembro a Abril de 2011/2012 com os mesmos meses em 2010/2011 e 2009/2010 comparando ainda com os valores médios da normal de 1971-2000. Na figura 5.10 comparam-se os valores de precipitação dos meses de Novembro a Abril de 2011/2012 com os mesmos meses em 2010/2011 e 2009/2010 comparando ainda com os valores médios da normal de 1971-2000.

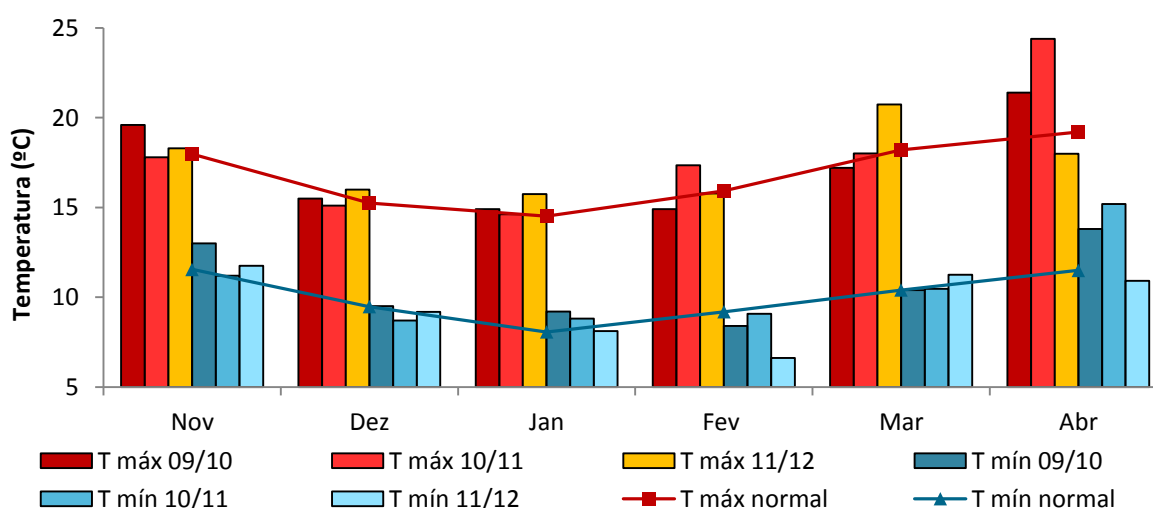


Figura 5.9 – Evolução das temperaturas máximas e mínimas de Novembro a Abril nos últimos três anos e comparação com a normal climatológica de 1971-2000 – Lisboa [31-48]

Da análise da figura 5.9 conclui-se que a evolução das temperaturas médias máximas e mínimas para o intervalo de Novembro a Abril de 2011/2012 estão coerentes com os valores da normal de 1971-2000, verificando-se o maior desfasamento para a temperatura média mínima do mês de Fevereiro de 2012, com uma diferença de -2,57 °C.

Na figura 5.10 verifica-se que o mês de Novembro de 2011 apresenta um valor de precipitação superior aos dois anos transactos e à normal de 1971-2000, uma tendência que viria a ser quebrada no mês de Dezembro com uma queda abrupta da precipitação, registando-se uma queda de -266,7 mm face a 2010/2011 e de 95,3 mm face à normal, começando aqui a evidenciar-se o perigo de seca.

Os meses de Janeiro e Fevereiro confirmam a tendência, acentuando o risco de seca com grandes quebras nos valores de precipitação. No mês de Fevereiro não se verificou qualquer precipitação, o que o qualifica, a nível nacional, como o Fevereiro mais seco desde 1931.

O mês de Março iniciou-se igualmente com baixos níveis de precipitação, tendo equilibrado os valores no decorrer dos últimos dias, mantendo-se contudo abaixo da precipitação verificada para os dois anos transactos e para a normal climatológica.

Abril apresentou-se como um mês mais chuvoso, com os valores mais elevados de precipitação desde Dezembro, continuando contudo a mostrar valores inferiores aos dos últimos dois anos e à normal climatológica, o que confirma a tendência de 2012 ser um dos anos mais secos dos últimos anos.

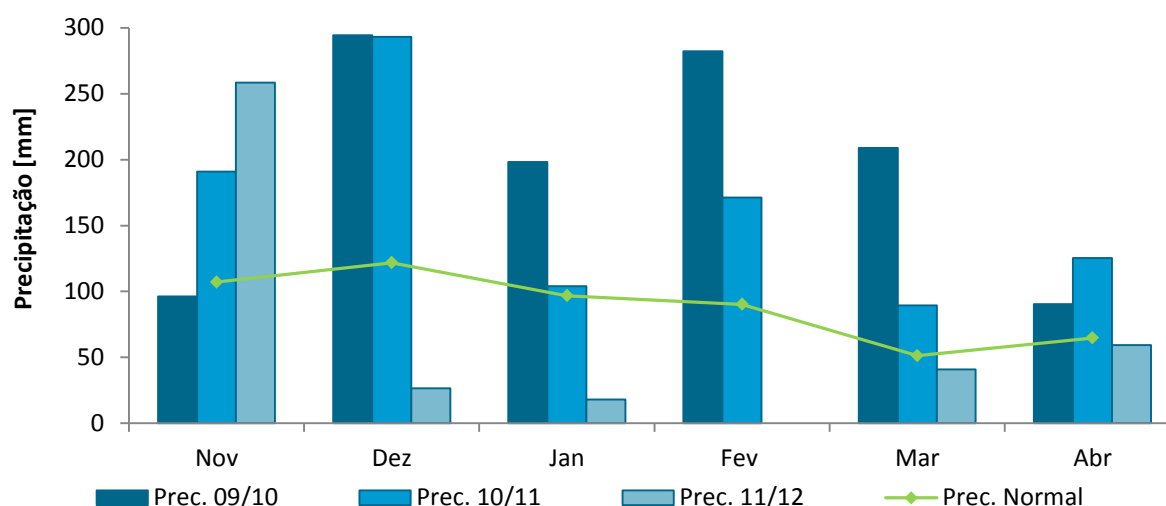


Figura 5.10 - Evolução da precipitação de Novembro a Abril nos últimos três anos e comparação com a normal de 1971-2000 – Lisboa [31-48]

5.3. Equipamentos utilizados

Para a realização do presente estudo recorreu-se a uma variada gama de aparelhos, electrónicos e analógicos. Na monitorização automatizada do edifício utilizaram-se três tipos de receptores de dados. Para controlar as condições higrométricas da nave principal da Igreja usou-se um *data logger* da marca Delta T, que tem a capacidade de acoplar termopares, termístores e sondas de humidade relativa e temperatura. Utilizaram-se também dispositivos portáteis de modelo *Hobo U12-13* e *Rotronic HygroLog HL-NT2*.

Utilizou-se ainda um psicrómetro de roca e um aparelho para medição de temperaturas superficiais, para confirmar esporadicamente as leituras obtidas de forma automática.

5.3.1. Data logger ΔT DL2e

Para determinar as temperaturas e humidades relativas na nave principal da Igreja recorreu-se a um aparelho receptor de dados, *data logger* da marca Delta T, modelo DL2e (figura 5.11).

Este aparelho é um dispositivo programável capaz de fazer leituras e armazenar dados provenientes de inúmeras fontes. Neste estudo recorreu-se à utilização de termopares e de uma sonda de

humidade relativa e temperatura, como se poderá ver em maior pormenor nos pontos 3.5.1.1 e 3.5.1.2.

É um aparelho resistente, que pode operar em condições de extrema humidade e sob gamas de temperaturas baixas e elevadas. É alimentado por corrente eléctrica ou com recurso a pilhas do tipo AA. Possui ainda uma pilha de lítio capaz de salvaguardar os dados em caso de falha de energia, uma vez que estes são armazenados em memória RAM, que formata em caso de falha de alimentação.



Figura 5.11 – Data logger DL2e da marca Delta T

O data logger pode suportar quatro cartões receptores de dados, cada um com quinze entradas de dados, caso se deseje uma boa fiabilidade, ou para trinta caso a precisão não seja determinante. No caso presente utilizaram-se dois cartões com 20 termopares e uma sonda de temperatura e humidade relativa, que serviu também de referência para os restantes sensores. Este dispositivo apresenta um erro normal de $\pm 0,02\%$ podendo atingir valores máximos de $0,1\%$ [63].

O aparelho pode ser facilmente programado com recurso ao programa *DL2 Program Editor*, definindo-se o tipo de sensor que entra em cada porta e o intervalo de leituras, como se pode observar na figura 5.12.

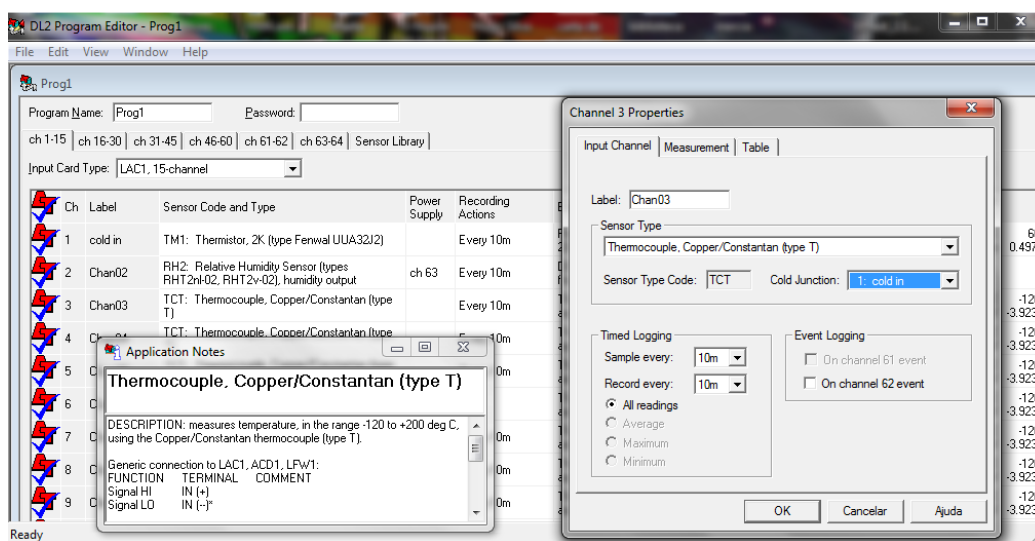


Figura 5.12 – Programa de edição do data logger DL2e – DL2 Program Editor

O programa de leituras, a leitura de dados, a definição da hora e data e do início das leituras, e a verificação dos vários sensores podem ser efectuados através da ligação do *data logger* a um computador com porta série do tipo RS232 e recurso ao programa *DL2 Control Panel*, como se verifica na figura 5.13.

Todos os dados transferidos podem ser visualizados com o programa *DL2 Dataset Viewer* e importados para uma folha de cálculo com recurso a uma aplicação denominada *Dataset Import Wizard 1.6* [62].

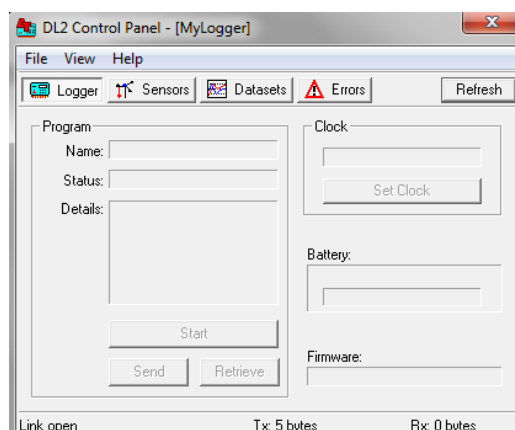


Figura 5.13 – Programação e definições básicas do *data logger* DL2e – *DL2 Control Panel*

5.3.1.1. Termopares

Para a medição das temperaturas utilizaram-se termopares do tipo T, compostos por dois fios condutores, um de cobre (termo-elemento positivo – castanho) e outro de uma liga metálica denominada como constantan (termo-elemento negativo – branco). Na figura 5.14 pode-se observar um rolo de cabo termopar.



Figura 5.14 – Bobine de termopar tipo T

Estes dois fios encontram-se ligados ao aparelho principal que envia sinais eléctricos e devem ter as pontas unidas no local onde se pretende obter a medição, determinando-se a temperatura pela diferença do potencial eléctrico criada na junção dos dois metais [27], como se pode verificar de forma esquemática na figura 5.15.

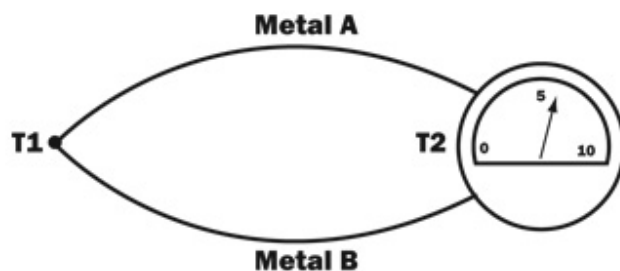


Figura 5.15 – Esquema de obtenção da temperatura T1 no ponto 1 pelo diferencial de potencial eléctrico medido no aparelho em T2 [67]

Estes termopares permitem a medição de temperaturas numa vasta gama, entre os -120°C e os 200°C , com uma precisão satisfatória e facilidade na obtenção de resultados. É importante ressaltar que os termopares apresentam um erro máximo de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ para temperaturas entre os -20 e os $+60^{\circ}\text{C}$ e uma distância máxima ao aparelho central de dez metros, a partir da qual o erro tende a aumentar [63].

5.3.1.2. Sonda de temperatura e humidade relativa RHT2nI

A sonda de temperatura e humidade relativa RHT2n da ΔT (figura 5.16) é composta por um termistor de $2\text{ k}\Omega$ para medir a temperatura e por um sensor de medição da humidade relativa.

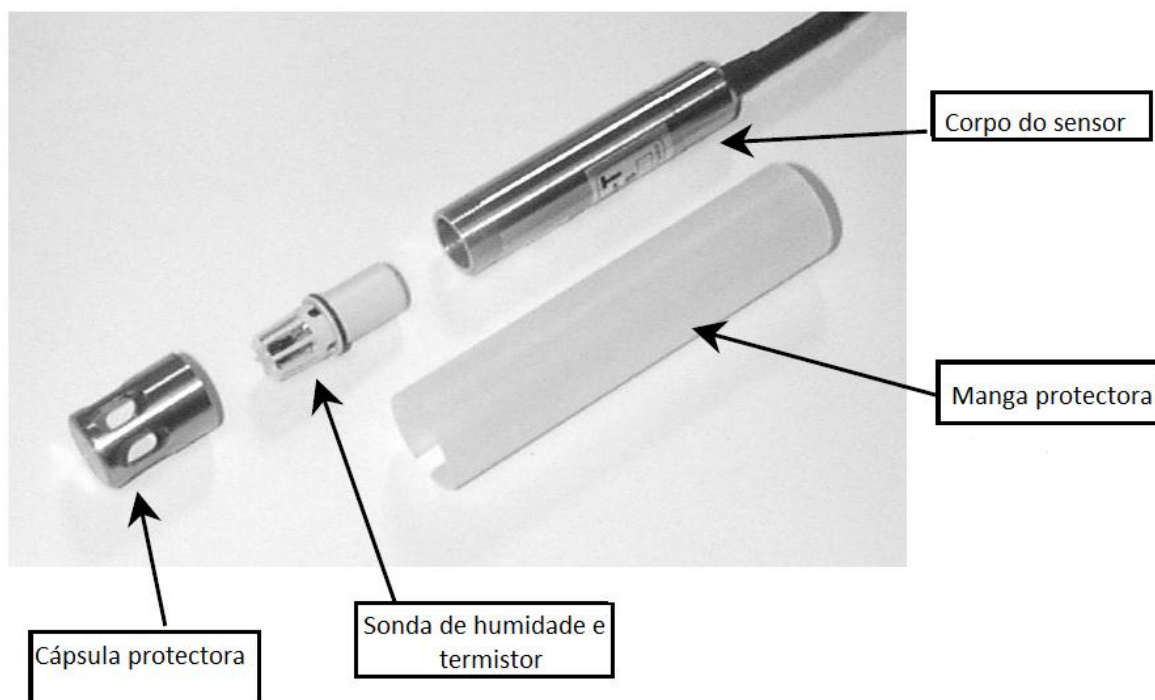


Figura 5.16 – Sonda de temperatura e humidade relativa da ΔT [65]

A obtenção da temperatura pelo termistor consiste na medição da variação da condutibilidade eléctrica de um elemento sensível à acção da temperatura, apresentando uma precisão de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ e medindo temperaturas na gama de -20°C a $+60^{\circ}\text{C}$ [27,65].

A sonda de medição de humidade relativa apresenta um erro para uma temperatura do ar de 23°C de $\pm 2\%$ para humidades relativas entre os 5 e os 95% e de 2,5% para humidades relativas inferiores a 5% ou superiores a 95% [65].

5.3.2. Hobo U12-13

Utilizaram-se também quatro aparelhos Hobo U12-13 da marca Onset com a capacidade de medirem temperaturas e humidades relativas de forma automática e de armazenarem dados até 43000 medições, tendo a grande vantagem de serem portáteis.

Este sensor pode medir temperaturas entre os -20°C e os +70°C com uma precisão de 0,03°C com um erro máximo de $\pm 0,35^\circ\text{C}$ para o intervalo entre os 0°C e os 50°C. No que concerne à humidade relativa, mede de forma eficaz valores entre os 5% e os 95% com uma precisão de 0,03% e um erro associado de $\pm 2,5\%$ para valores entre os 10% e os 90%. As temperaturas são medidas por intermédio de um termistor e as humidades relativas com recurso a um sensor específico.

O Hobo U12-13 (figura 5.17) pode fazer leituras com intervalos desde 1 segundo até 18 horas. Em condições normais a bateria dura cerca de um ano, sendo necessário ter cuidados redobrados com a sua verificação, pois em caso de descarga os dados registados são perdidos.

O aparelho apresenta um tempo de resposta médio de 6 minutos para a temperatura e 1 minuto para a humidade relativa, quando sujeito a um fluxo de ar com uma velocidade de 1 m/s [28].

A programação e o acesso aos seus dados podem ser feitas de forma rápida e prática através da utilização do programa *Hoboware Lite*, sendo que para tal basta ligar o aparelho a qualquer computador por intermédio de um cabo mini USB.



Figura 5.17 – Aparelho portátil de medição de temperatura e humidade relativa *Hobo U12-13*

5.3.3. Rotronic HygroLog HL-NT2

Para completar o processo de medições automáticas utilizaram-se ainda três aparelhos *HygroLog HL-NT2* da marca Rotronic (figura 5.18) com a capacidade de medirem temperaturas e humidades

relativas de forma automática e de armazenarem dados de forma segura e quase ilimitada, visto estarem dotados de cartões de memória de 16 MB, tendo a grande vantagem de serem portáteis e terem mostrador próprio.

Este sensor pode medir temperaturas entre os -30°C e os $+70^{\circ}\text{C}$ e humidades relativas entre os 0% e os 100% com um erro associado de $\pm 1,5\%$ para uma temperatura de 23°C . O HydroLog HL-NT2 pode fazer leituras com intervalos desde 5 segundos até 24 horas. Em condições normais a bateria dura cerca de um ano.

Pode-se programar e aceder aos seus dados de forma rápida e prática, de forma directa através do seu próprio ecrã ou ligando o aparelho a qualquer computador, com recurso a um utensílio fornecido pela marca e com a utilização do programa *HW4-E* [64].



Figura 5.18 - Aparelho portátil de medição de temperatura e humidade relativa *HydroLog HL-NT2*

5.3.4. Psicrómetro de roca

Os psicrómetros são constituídos por dois termómetros de mercúrio montados lado a lado, em que um mede a temperatura do ar (termómetro de bolbo seco), e o outro a temperatura resultante da evaporação de água (termómetro de bolbo húmido). Este último dispõe de uma gaze que envolve o recipiente de mercúrio, a qual é humedecida com o líquido. Para acelerar a evaporação faz-se passar uma corrente de ar pelos termómetros, obtida por rotação manual do aparelho em torno do punho (figura 5.19).



Figura 5.19 – Psicrómetro de roca

A evaporação da água é sempre acompanhada por um abaixamento de temperatura, o qual é função do estado higrométrico do ar. Quanto menor for a humidade relativa do ar, mais rápida será a evaporação do líquido e maior o arrefecimento que lhe está associado. Quando o ar está saturado não existe qualquer evaporação e, consequentemente, o arrefecimento é nulo.

Através da comparação das temperaturas de bolbo seco e bolbo húmido e por consulta de uma tabela psicrométrica torna-se possível determinar o estado de humidade do ar [27].

5.3.5. Aparelho de medição de temperaturas superficiais

Para confirmar as medições superficiais obtidas de forma automática, utilizou-se ocasionalmente um termómetro digital específico, da marca Roline, modelo 305 (figura 5.20).

O termómetro apresenta uma precisão de 0,1 °C, com um erro máximo associado de $\pm 1^\circ\text{C}$; é alimentado por uma pilha de 9 V. As leituras são efectuadas através de um termopar tipo K, encostando a ponteira à superfície. Estas especificações foram obtidas no manual que acompanha o equipamento.



Figura 5.20 – Termómetro digital para medir temperaturas superficiais

5.4. Procedimento experimental

De modo a supervisionar o microclima da Igreja e a compará-lo com os valores exteriores, procedeu-se à instalação de um conjunto importante de sensores para a sua monitorização automática. Instalaram-se no total vinte termopares e uma sonda de humidade relativa e temperatura ligados ao *data logger*. Adicionalmente, instalaram-se ainda quatro sensores *Hobo U12-13* e três sensores *Rotronic HydroLog HL-NT2*.

5.4.1. Monitorização automática do clima interior e exterior da Igreja

Para a monitorização automática do clima na nave principal da Igreja, recorreu-se à utilização do *data logger Delta T* associado ao uso de termopares e de uma sonda que mede humidade relativa e temperatura. Esta sonda serviu ainda de referência para os restantes termopares.

Implementou-se um conjunto importante de sensores, perfazendo um total de vinte e um pontos de controlo. Quatro dos sensores foram seleccionados para recolher informações acerca das temperaturas superficiais e os restantes para a temperatura do ar.

Por limitações relacionadas com a disponibilidade de material, foi necessário fasear a implementação dos sensores por três fases, ressaltando-se o objectivo de cobrir a maior área espacial possível e verificar as condições a diferentes cotas de modo a aferir a evolução da temperatura e humidade relativa e possíveis estratificações do ar.

Implementaram-se ainda quatro sensores *Hobo U12-13* e três sensores *Rotronic HydroLog HL-NT2* com o intuito de se obterem resultados em pontos singulares, onde não era possível chegar com os termopares. Definiu-se um intervalo de leituras de 10 minutos.

Para facilitar a obtenção e tratamento dos dados catalogaram-se os vários sensores, com uma denominação própria para cada um deles. Para os sensores ligados ao *data logger* adoptou-se uma numeração simples de 1 a 21, por ordem de instalação, com os primeiros quatro a recolherem dados superficiais e os restantes das propriedades do ar. Para os sensores portáteis *Hobo* e *Rotronic* adoptou-se uma numeração composta por uma letra maiúscula e um número. A letra representa a marca do aparelho, “H” para os *Hobo* e “R” para os *Rotronic*, completando-se com a numeração, consoante o número de aparelhos disponíveis.

- **1ª Fase:**

Na primeira fase, que decorreu no dia 11 de Novembro de 2011, começou-se por instalar o *data logger*. Optou-se por colocá-lo no púlpito norte, que tem acesso reservado pela sacristia, pois considerou-se ser esta a zona mais condicionante da Igreja, por estar sujeita a um menor número de horas de exposição solar, sendo assim susceptível de que caso ocorressem condensações superficiais estas se verificassem neste local.

Nesta fase instalou-se a sonda de temperatura e humidade relativa também no púlpito norte, que serviu de referência para os restantes sensores, quatro termopares para controlo de temperaturas superficiais e cinco termopares de controlo da temperatura do ar.

Instalaram-se ainda todos os aparelhos de medição portáteis, tendo-se colocado, como se encontra especificado na tabela 5.1, os *Hobo U12-13* na torre norte (torre sem sino) - H1 - devidamente protegido do vento e da chuva, para controlar os parâmetros exteriores (figura 5.24). Os restantes foram instalados no interior da Igreja em pontos singulares, no altar-mor - H2, no púlpito norte - H3 - para se poderem comparar os valores obtidos pelos diferentes aparelhos e o quarto no coro - H4. Os aparelhos *Rotronic* colocaram-se na sacristia - R1, no desvão da cobertura - R2 - e na casa mortuária - R3.

Na tabela 5.1 pode-se observar a numeração, tipo e disposição dos sensores instalados na primeira fase.

Tabela 5.1 – Sensores instalados na 1ª fase

Sensor	Tipo	Localização	Altura [m]
1	Superficial	Fachada norte	3,90
2	Superficial	Fachada norte	1,50
3	Superficial	Pavimento - degrau	0,15
4	Superficial	Pavimento	0,00
5	Ar	Púlpito norte	3,90
6	Ar	½ nave	3,90
7	Ar	Púlpito sul	3,90
8	Ar	Fachada norte	7,50
9	Ar	½ nave	7,50
10	Ar	Fachada norte	1,50
H1	Ar	Torre norte	-
H2	Ar	Altar-mor	-
H3	Ar	Púlpito norte	3,90
H4	Ar	Coro	5,30
R1	Ar	Sacristia	1,80
R2	Ar	Desvão cobert.	-
R3	Ar	Casa Mort.	2,30

- **2ª Fase**

A segunda fase decorreu no dia 2 de Dezembro de 2011, com a instalação de três novos sensores, para medir a temperatura do ar, como se descreve na tabela 5.2. Ficou assim completa a coluna vertical de controlo da temperatura e humidade relativa do ar junto ao púlpito norte.

Tabela 5.2 - Sensores instalados na 2ª fase

Sensor	Tipo	Localização	Altura [m]
11	Ar	Fachada norte	0,15
12	Ar	Fachada norte	10,00
13	Ar	Púlpito sul	7,50

- **3ª Fase**

A terceira fase decorreu no dia 22 de Dezembro de 2011, com a instalação de oito novos sensores para medir a temperatura do ar, como se descreve na tabela 5.3.

Devido a problemas técnicos com o aparelho H1, colocado na torre, houve a necessidade de o substituir, passando o aparelho H2 para a torre e o H4 para o altar-mor. As medições no coro passaram a efectuar-se com recurso a um termopar.

Tabela 5.3 - Sensores instalados na 3ª fase

Sensor	Tipo	Localização	Altura [m]
14	Ar	F. norte/ent.	3.90
15	Ar	½ nave/ent.	3.90
16	Ar	F. sul/ent.	3.90
17	Ar	Coro	5.30
18	Ar	Altar norte	5.30
19	Ar	Altar ½	5.30
20	Ar	Altar sul	5.30
21	Ar	Porta sacristia	3.10
H2	Ar	Torre norte	-
H4	Ar	Altar-mor	-

Nas figuras 5.21 e 5.22 apresentam-se a disposição dos sensores em planta e corte, respectivamente.

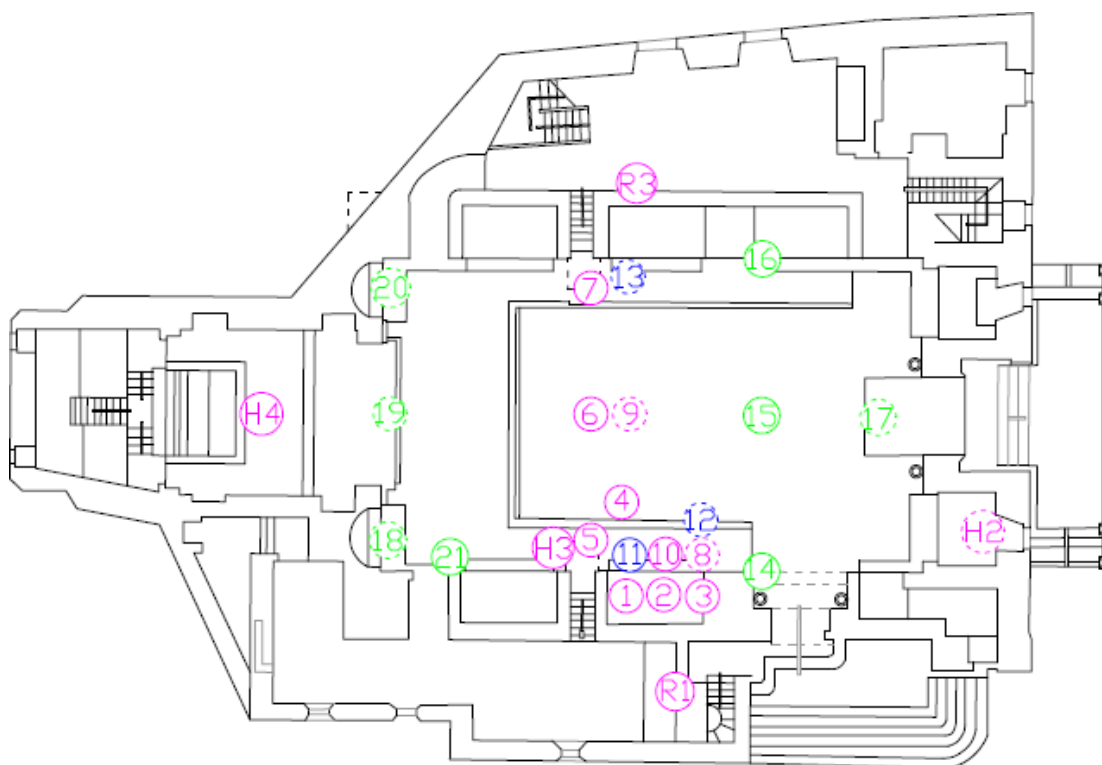


Figura 5.21 – Disposição dos sensores em planta, com a cor rosa a representar a 1ª fase, a azul a 2ª fase e a verde a 3ª fase [55]

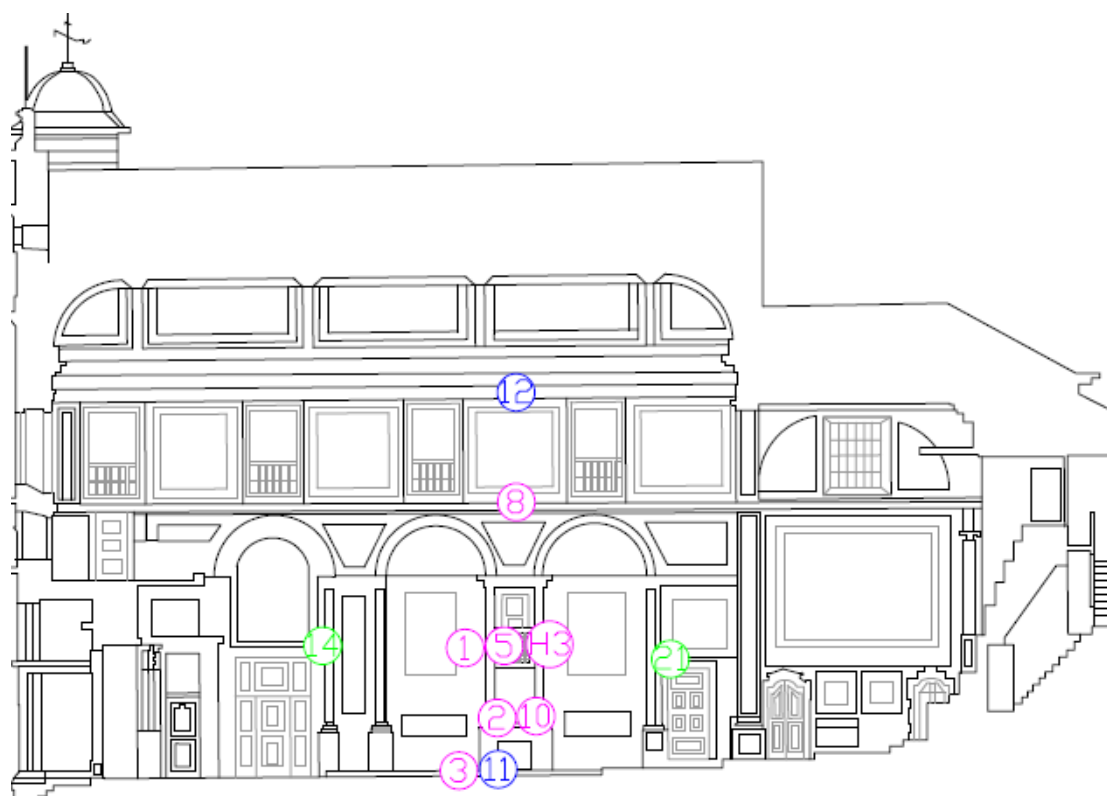


Figura 5.22 - Disposição dos sensores em corte longitudinal, com a cor rosa a representar a 1ª fase, a azul a 2ª fase a a verde a 3ª fase [55]

Nota: Os termopares são muito frágeis, tendo-se recorrido à utilização de fio de *nylon* sempre que houve necessidade de os suspender.

Nas figuras 5.23 e 5.24, apresentam-se, respectivamente, a disposição geral dos termopares na nave principal e o aparelho portátil de monitorização das condições exteriores, colocado na torre norte e sua protecção.

5.4.1.1. Resumo das medições automáticas

Depois de concluído o processo de instalação, ficou-se com um total de vinte e quatro pontos monitorizados no interior da Igreja, um no exterior e outro no desvão da cobertura.

Monitorizou-se uma coluna vertical junto do púlpito norte, com cinco sensores de monitorização da temperatura do ar a 0,15 m, 1,50 m, 3,90 m, 7,50 m e 10 m, como recomendado na bibliografia [7,8,60].

Foi ainda possível controlar as variações ambientais em planta, com três filas de três sensores cada, colocados transversalmente junto ao altar, a ligar os dois púlpitos e a unir os dois últimos altares laterais junto à entrada principal. Foi ainda possível comparar a variação de condições a dois níveis diferentes, na transversal que atravessa os dois púlpitos. Foi também colocado um termopar junto à entrada da sacristia, outro no coro e os restantes quatro para controlo de temperaturas superficiais.

Com os aparelhos portáteis foi possível monitorizar as condições higrotérmicas da sacristia, da casa mortuária, do altar-mor, do exterior e do desvão da cobertura.

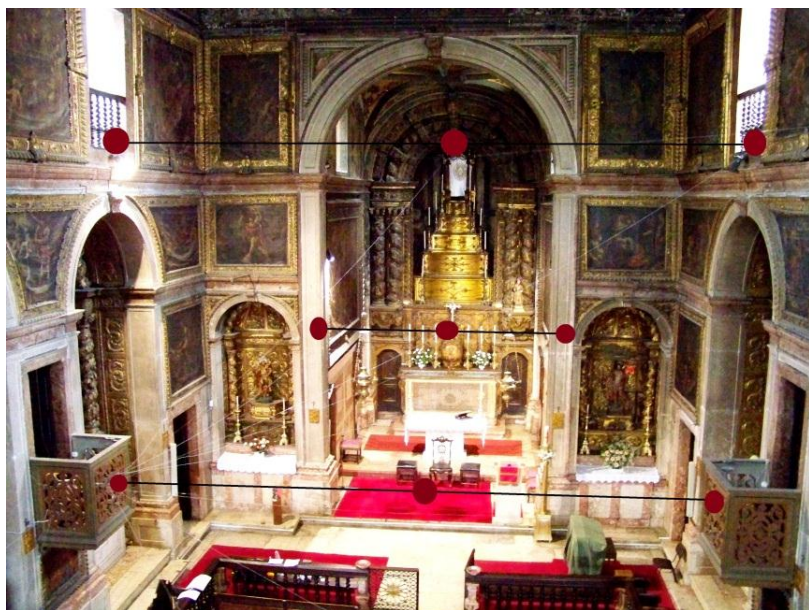


Figura 5.23 – Disposição geral dos termopares na nave principal da Igreja



Figura 5.24 – Aparelho de monitorização das condições exteriores e sua protecção

5.4.1.2. Tratamento dos dados

Os aparelhos portáteis fornecem leituras de temperatura em graus centígrados e de humidade relativa em percentagem, não sendo necessário qualquer tipo de tratamento.

Para o caso dos dados recolhidos com o *data logger* foi necessário admitir que a concentração de vapor de água é constante em toda a sala para se conseguir obter o valor da humidade relativa em todos os pontos pela relação com a temperatura. Esta consideração não é abusiva, pois a sala apresenta-se fechada e tem grandes dimensões, sendo praticamente desprezáveis as variações espaciais da concentração do vapor de água para determinado instante, pois não existem fontes de incremento desta propriedade.

A sonda de humidade relativa e temperatura fornece os respectivos dados, sendo assim possível correlacioná-los com os valores das temperaturas dos restantes pontos [26] através da equação 5.1,

$$H_r = \frac{v}{v_{sat}} \quad (5.1)$$

onde o limite de concentração de vapor de água para o ponto conhecido é dado pela equação 3.14 e a concentração de vapor de água, que é constante no espaço para determinado instante, é dada pela equação 3.15.

Posto isto, torna-se fácil chegar ao valor da humidade relativa para todos os pontos em que se conhece a temperatura, variando apenas o valor do limite da concentração de vapor de água em função da temperatura, como se observa na equação 3.14.

Depois de obtidos os valores da temperatura e da humidade relativa para todos os pontos interiores e exteriores, foram tratados sob a forma de gráficos para uma mais fácil compreensão de todos os fenómenos. Elaboraram-se gráficos de linhas que representam a evolução da temperatura e da humidade relativa global, tendo-se depois elaborado novos gráficos mostrando as mesmas variáveis para um período de tempo mais reduzido, ao longo de uma semana para cada estação do ano, comparando as diferenças entre pontos a diferentes cotas, em diferentes locais e comparando as condições interiores e exteriores. Realizaram-se ainda gráficos barras que apresentam as amplitudes de temperatura e humidade relativa diárias e respectivos limites aconselhados para se manterem condições favoráveis à conservação dos materiais e artefactos.

5.4.2. Monitorização manual e tratamento de dados

Ao longo de todo o processo de monitorização do microclima da Igreja efectuaram-se várias medições manuais com recurso ao psicrómetro de roca e ao aparelho de medição de temperaturas superficiais, de modo a aferir a correlação com as medições automáticas.

Realizaram-se ainda, nos dias 8 de Março e 3 de Maio de 2012, baterias de leituras com recurso ao dispositivo portátil *Hobo U12-13*, medindo-se 34 pontos em planta (figura 5.25) a 4 alturas diferentes, perfazendo um total de 136 pontos com dados conhecidos. Isto possibilitou um conhecimento mais profundo do comportamento higrotérmico do interior da nave principal da Igreja.

Dadas as limitações de nível arquitectónico não foi possível definir uma malha de medidas constantes ao longo de toda a sala. Manteve-se o espaçamento de 2,10 m entre os 5 pontos colocados na transversal, tendo sido necessário variar o espaçamento entre os 7 pontos longitudinais, verificando-se um afastamento máximo de 2,90 m. Em altura, fizeram-se medições a 0,15 m, a 2,85 m, a 6,45 m e a 10,95 m, sempre em relação ao pavimento.

Para este conjunto de medições utilizou-se um único aparelho, com o intuito de minimizar os erros e aumentar a coerência dos resultados [7,8,11,25]. Este processo de monitorização manual tem sido corrente nos estudos referenciados, não se apresentando contudo explicita a metodologia exacta para o seu desenvolvimento. Como tal, para se conseguirem efectuar as leituras, optou-se pela utilização de um balão de material comum com 80 cm de diâmetro cheio com hélio. O hélio, por apresentar uma densidade inferior à do ar, sobe, exercendo uma força de impulsão sobre o balão, tendo-se acoplado a si o aparelho de medição e um fio de *nylon*, com marcações para as alturas de monitorização.

Para ultrapassar o problema do tempo de resposta do aparelho e aumentar a coerência dos resultados, deixou-se repousar o aparelho durante 2 minutos em cada ponto antes de se iniciar a contagem. Findo este período efectuaram-se leituras de 3 em 3 segundos, completando-se 16 leituras para cada ponto. No final efectuou-se a média destes 16 valores, tendo-se verificado diferenças muito pequenas e um desvio padrão desprezável para todos os pontos, sendo assim possível validar a média obtida.

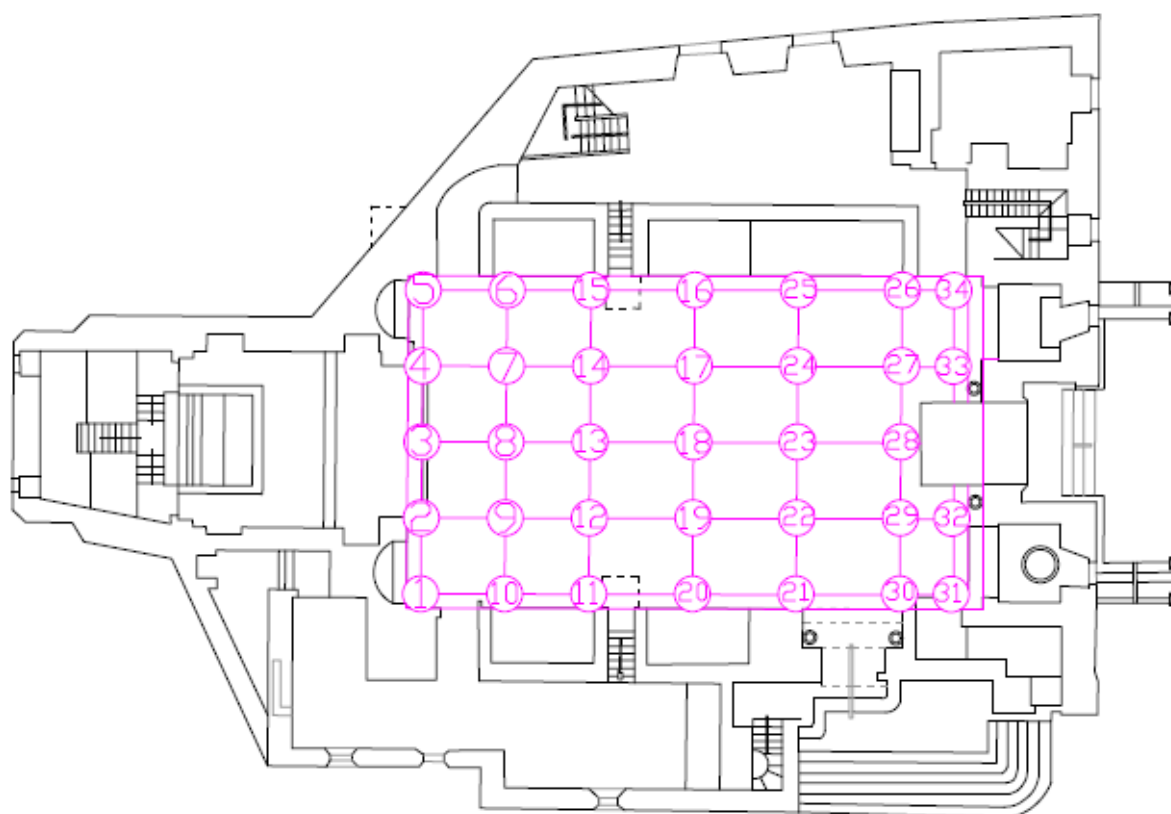


Figura 5.25 – Planta dos pontos de leitura para a caracterização do microclima interior da Igreja [55]

Nas figuras 5.26 e 5.27 apresentam-se as fotografias referentes às medições manuais com recurso ao balão com hélio.

Após a obtenção de todos os valores recorreu-se à utilização do programa *Surfer* da Golden Software para a reprodução de mapas de isolinhas e representações tridimensionais.

Este programa é utilizado para a produção de mapas de diversos tipos de variáveis com base em valores conhecidos e distribuídos no espaço. É uma ferramenta que facilita a tarefa de desenhar mapas, dispensando o recurso a técnicas manuais e à complexa utilização de algoritmos matemáticos para a interpolação de dados e refinamento das malhas.

O processo de interpolação apresenta-se como algo útil e necessário para aumentar o rigor no traçado de mapas, refinando determinada malha com base em pontos realmente medidos e efectuando aproximações para os pontos desconhecidos. Existem inúmeros métodos de interpolação, sendo os mais comuns a triangulação linear, a triangulação de Delaunay, os polígonos de Voronoi, o inverso da potência da distância, a mínima curvatura, a regressão polinomial, a máxima entropia Bayesiana e a Krigagem. Na tabela 5.4 apresentam-se alguns dos métodos referidos e uma rápida comparação entre as suas principais características [50].

Para o corrente trabalho recorreu-se à utilização de uma malha de 0,15 cm, utilizando-se como método de interpolação a Krigagem linear.

O programa apresenta uma interface simples que possibilita uma fácil e rápida utilização, conseguindo ler dados a partir de ficheiros gerados por folhas de cálculo.

Elaboraram-se mapas de isolinhas com coloração para as temperaturas e humidades relativas e mapas tridimensionais.



Figura 5.26 – Exemplificação das medições feitas em altura



Figura 5.27 – Balão com o sensor acoplado e garrafa de hélio

Tabela 5.4 – Comparação entre vários métodos de interpolação [50]

Algoritmo	Fidelidade aos dados originais	Suavidade das curvas	Velocidade de cálculo	Precisão geral
Triangulação	1	5	1	5
Inverso da distância	3	4	2	4
Superfície/tendência	5	1	3	2
Mínima curvatura	2	3	5	1
Krigagem	2	3	5	1
1=melhor	5=pior			

6. Apresentação e análise de resultados

O presente estudo permitiu a caracterização do microclima interno da Igreja de S. Cristóvão, tal como a comparação de valores de temperatura e humidade relativa para vários pontos, incluindo os valores exteriores ao edifício.

Para a sua correcta caracterização e para fornecer uma descrição cuidada e eficaz optou-se pela apresentação dos valores globais no início, podendo-se assim ter uma percepção geral da evolução da temperatura e da humidade relativa ao longo de todo o período em estudo. Refinou-se depois a análise, com a apresentação de uma semana para cada estação do ano (Outono, Inverno e Primavera) para compreender de forma mais eficaz os ciclos diários e a relação entre os vários pontos estudados. Seguiu-se a apresentação de gráficos que representam os ciclos diários verificados para a temperatura e humidade relativa, de modo a averiguar as condições para a conservação de materiais e artefactos.

Apresentam-se ainda mapas de isolinhas e gráficos tridimensionais para a caracterização profunda da nave principal da Igreja em função da temperatura e da humidade relativa, pelos dados fornecidos pelas leituras manuais em planta e em corte.

Devido a problemas relacionados com o aparelho de leitura colocado no interior da Igreja, não ocorreram medições no período compreendido entre 18 de Janeiro e 14 de Fevereiro de 2012, pelo que se optou por retirar também este período dos restantes aparelhos para possibilitar uma correcta comparação.

No decorrer do texto, os termos Outono/Inverno e Primavera/Verão não apresentam um sentido literal. Entende-se por Outono/Inverno como o período compreendido entre o início da descida das temperaturas e a data em que se verifica o final da tendência descendente e por Primavera/Verão o período a partir desta data, quando se começa a verificar a tendência de subida da temperatura e até à inversão da mesma.

6.1. Resultados globais

Apresentam-se os resultados para o período de tempo compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012, com excepção do período entre 18 de Janeiro e 14 de Fevereiro de 2012, como se adiantou no ponto anterior.

Através da análise dos gráficos presentes nas figuras 6.1 e 6.2 pode-se comparar a evolução da temperatura e humidade relativa, respectivamente, para o exterior e interior ao centro da nave principal a uma altura de 3,90 m e para o desvão da cobertura.

No que respeita à temperatura (figura 6.1), observam-se variações mais acentuadas no exterior, como seria de esperar, verificando-se uma tendência decrescente entre 11 de Novembro de 2011 e 16 de Janeiro de 2012, invertendo-se depois a tendência.

No desvão da cobertura verificam-se variações menos acentuadas do que no exterior. As temperaturas são, em geral, inferiores às exteriores, principalmente durante o Inverno, apesar de manterem valores superiores aos verificados pelos picos negativos da temperatura exterior. A partir de Fevereiro, quando as temperaturas exteriores começam a subir, os valores no desvão acompanham essa tendência, embora se mantenham sempre com valores médios inferiores.

No interior da Igreja as variações são bem menos acentuadas do que nos dois pontos já abordados, acompanhando a tendência da temperatura exterior, apesar de com algum atraso, verificando-se a inversão da tendência de diminuição da temperatura a 16 de Fevereiro. Até este período, a temperatura média interior encontra-se acima da temperatura média exterior, verificando-se o contrário ao iniciar o período de Primavera/Verão, com o aumento da temperatura exterior. Isto deve-se essencialmente à grande inércia térmica do edifício, que atrasa e amortece os ciclos sazonais.

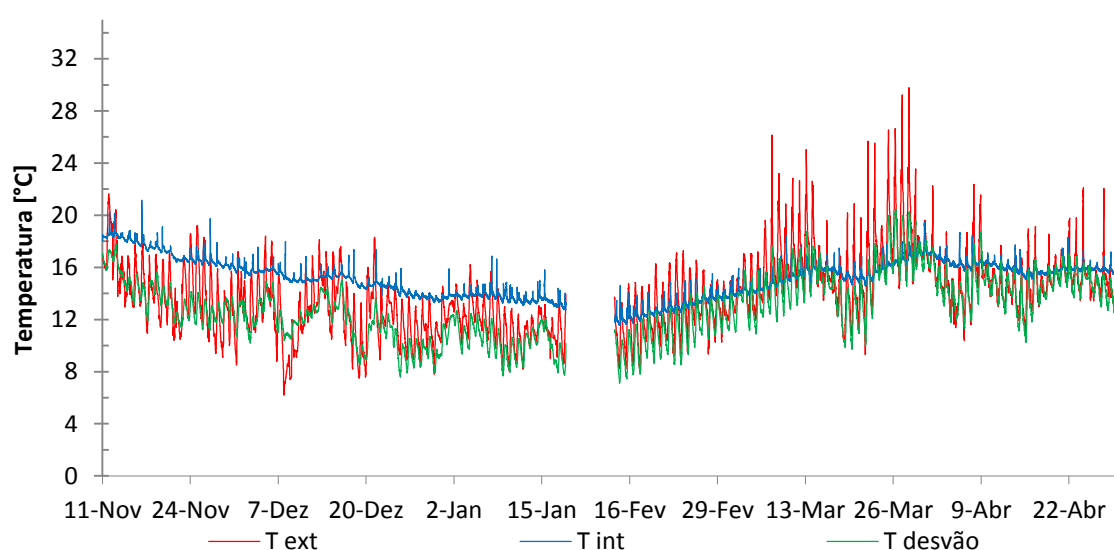


Figura 6.1 – Evolução da temperatura no exterior e interior da Igreja e no desvão da cobertura no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012

No que respeita à humidade relativa, como se pode ver na figura 6.2, os valores para o desvão e para o interior acompanham a tendência da humidade relativa exterior. No exterior verificam-se valores elevados, principalmente até 23 de Dezembro de 2011, próximos da saturação. Ocorre depois um ligeiro decréscimo até 16 de Janeiro de 2012, voltando a baixar a partir desta data, com um ligeiro pico positivo no início do mês de Março, rondando valores de 90%. Verificam-se valores particularmente baixos, inferiores a 30%, a 23 de Fevereiro e entre 20 e 27 de Março.

No desvão verificaram-se humidades relativas bastante elevadas até 17 de Janeiro de 2012. Durante este período inicial, registaram-se valores médios inferiores aos exteriores de 11 de Novembro a 23 de Dezembro, passando depois a apresentar um clima mais húmido até ao final do estudo.

A humidade relativa no interior acompanha a tendência exterior, apesar de apresentar valores muito mais baixos, nunca ultrapassando os 80%. Isto pode dever-se ao facto de a Igreja se encontrar aberta durante um curto período de tempo por dia, cerca de 2 horas e 30 minutos, sem muita movimentação de pessoas e por as janelas se encontrarem normalmente fechadas, devido ao risco

de furto e entrada de animais, não possibilitando assim a entrada de ar exterior, o que mantém um microclima interior muito estável.

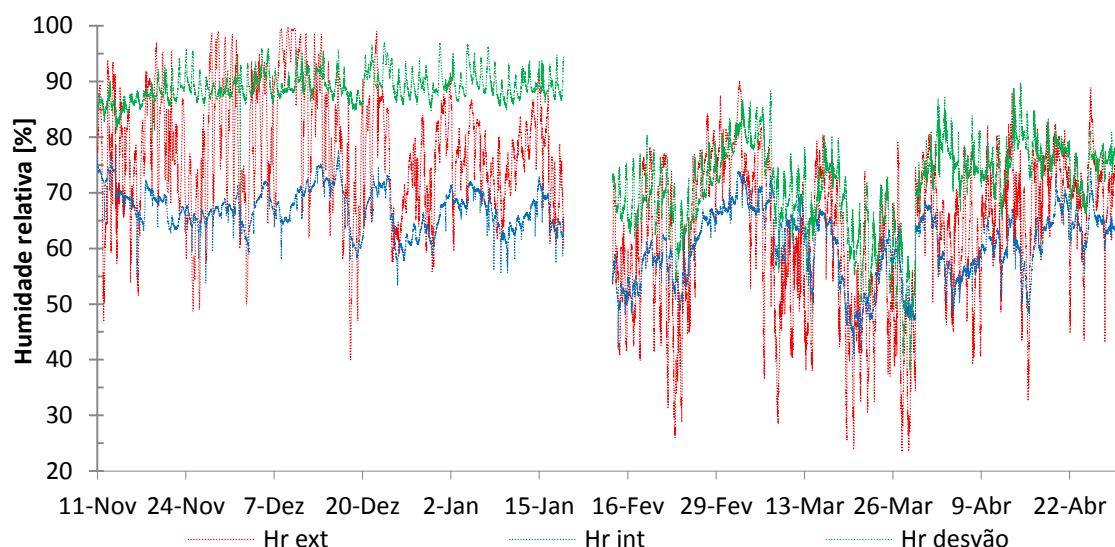


Figura 6.2 - Evolução da humidade relativa no exterior e interior da Igreja e no desvão da cobertura no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012

Na figura 6.3 apresenta-se a evolução das temperaturas no interior da Igreja para os sensores colocados na sacristia, que se situa a norte da nave principal, na casa mortuária situada a sul, no altar-mor e a meio da nave principal a uma altura de 3,90 m.

Todos os sensores apresentam um andamento similar entre si e ao andamento da temperatura exterior, apresentado na figura 6.1.

A sacristia apresenta-se como a zona mais fria do edifício, resultando do facto de estar orientada a norte e encoberta pelos edifícios circundantes, sendo a zona da Igreja que recebe menos radiação solar.

A casa mortuária, orientada a sul, que recebe a radiação solar directa e contém uma porta de entrada, apresenta uma temperatura média sempre superior à da sacristia, com valores semelhantes aos verificados no altar-mor para o período de Outono/Inverno, começando depois a se sobreelevar a partir de 14 de Fevereiro de 2012.

A temperatura na nave principal regista valores médios superiores à sacristia e próximos dos verificados na casa mortuária e no altar até Fevereiro, ficando depois abaixo dos valores da casa mortuária, dada a sua maior interioridade. Relativamente ao altar-mor, os seus valores na Primavera/Verão são inferiores aos verificados para a casa mortuária e nave principal, algo que se pode justificar com o facto de esta zona se encontrar enterrada, dispondo de uma maior inércia térmica.

Em termos de humidade relativa, como se pode verificar na figura 6.4, a nave principal e a sacristia apresentam, respectivamente, valores extremos, mínimos e máximos, até 14 de Fevereiro de 2012, momento em que se começa a notar um acréscimo nos valores de humidade relativa referentes ao altar-mor. A casa mortuária surge com valores intermédios ao longo de todo o período de estudo. O

facto de o altar-mor apresentar os valores interiores mais elevados de humidade relativa a partir da data referida, prende-se com o facto de ser a zona menos ventilada, tendo por vezes velas acesas e a presença das pessoas relacionadas com as comemorações religiosas, ocorrendo uma menor dissipação de humidade.

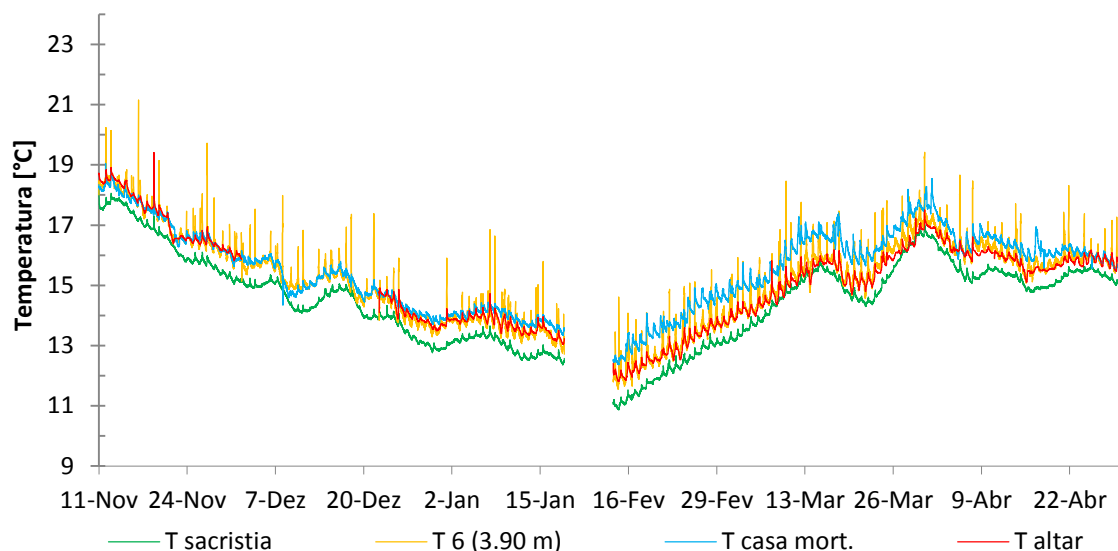


Figura 6.3 – Evolução da temperatura na zona central da nave da Igreja, na sacristia situada a norte e na casa mortuária a sul no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012

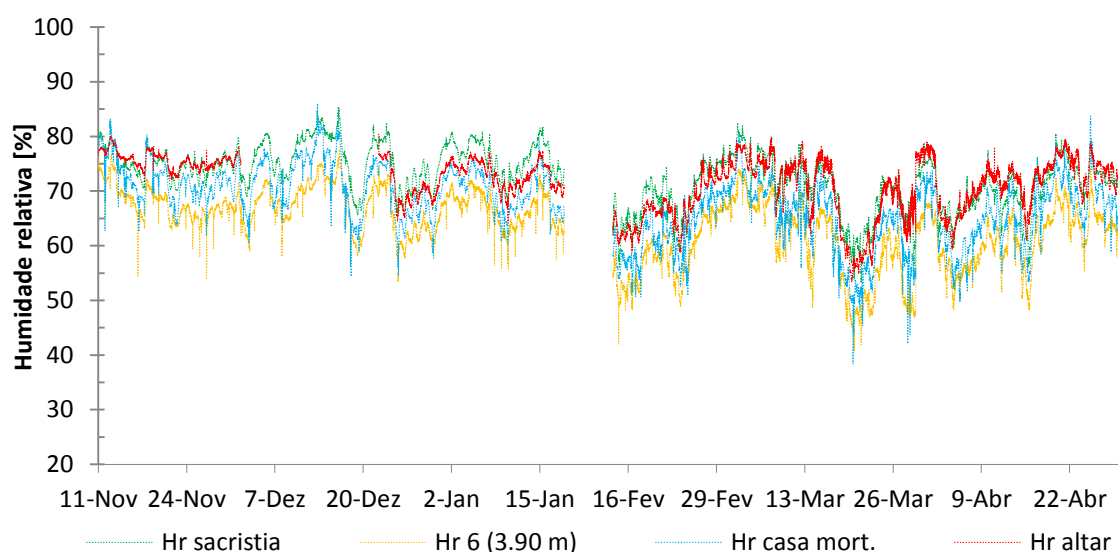


Figura 6.4 - Evolução da humidade relativa na zona central da nave da Igreja, na sacristia situada a norte e na casa mortuária a sul num período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012

Na figura 6.5 apresentam-se os andamentos da temperatura e da humidade relativa no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 a 30 de Abril de 2012 para alturas referentes ao pavimento de 0,15 m, 3,90 m, 7,50 m e 10,00 m. Esta coluna vertical encontra-se situada junto ao púlpito que se localiza na zona mais a norte da nave principal. Ressalve-se que os pontos a 0,15 m e 10,00 m só começaram a ser monitorizados a partir de dia 2 de Dezembro de 2011.

No período inicial, até 2 de Dezembro, quando só se têm dados para os pontos a 3,90 e 7,50 m, verifica-se uma tendência descendente das temperaturas, existindo variações muito pequenas entre os dois pontos. Verifica-se contudo que as temperaturas para uma altura de 3,90 m apresentam valores superiores aos verificados a 7,50 m. Isto pode dever-se ao facto de o ponto superior encontrar-se sob influência da cobertura, que se encontra mais fria, devido o seu contacto com o exterior.

De 2 de Dezembro a 16 de Fevereiro, continuaram a verificar-se pequenas diferenças entre os diversos pontos, com a temperatura a 0,15 m a apresentar-se superior à do ponto a 10,0 m, com os pontos a 3,90 e 7,50 m a registarem valores intermédios. Contudo, a 23 de Dezembro, começou a notar-se uma tendência de inversão, com as temperaturas dos pontos limite a aproximarem-se e com os valores do ponto a 7,50 m a ultrapassarem os valores verificados para os 3,90 m. Até 16 de Fevereiro o ar não se encontra estratificado por temperaturas, notando-se a presença de correntes convectivas motivadas pelo facto de o pavimento se encontrar a uma temperaturas mais alta e a cobertura a uma temperatura mais baixa que a restante envolvente. O pavimento, em contacto com o solo e com uma elevada inércia térmica, armazenou calor durante a Primavera/Verão, observando-se um desfasamento sazonal em relação à temperatura exterior. Já a cobertura, que se encontra em contacto directo com o exterior, está mais dependente das alterações ocorridas. O ar, ao contactar com as temperaturas mais quentes no pavimento, vai subir sucessivamente, até entrar em contacto com a cobertura, onde vai arrefecer e ganhar massa, até ser obrigado a descer novamente.

De 16 de Fevereiro a 7 de Março confirma-se a inversão da tendência, com as temperaturas junto à cobertura a aproximarem-se até ao ponto de cruzamento com as do pavimento. Contudo, só a partir de dia 8 de Março a temperatura junto ao pavimento apresenta valores abaixo das restantes, iniciando-se um novo ciclo, correspondente com o aumento das temperaturas exteriores. Devido ao atraso provocado pela elevada inércia térmica do edifício, no início da Primavera/Verão o pavimento encontra-se mais frio, mantendo-se sob influência das condições verificadas durante o Outono/Inverno. Por outro lado, a cobertura, em contacto com as temperaturas mais elevadas, aquece. Encontram-se assim reunidas as condições para a estratificação do ar por temperaturas, aumentando gradualmente desde o pavimento até à cobertura, como se observa na figura 6.5. Esta condição de estratificação e a ausência de correntes convectivas ascensionais evitam a movimentação de poeiras e outros poluentes, contribuindo para as boas condições de conservação dos vários materiais e artefactos presentes na Igreja.

No que se refere à humidade relativa, assumindo-se que a humidade absoluta é constante em toda a nave principal, vai variar em função da temperatura, aumentando quando esta diminui e o contrário.

As humidades relativas para as várias alturas apresentam pequenas variações entre si, com valores máximos próximos dos 80% e mínimos próximos dos 40%, sem nunca chegarem perto das condições de saturação.

Podem-se observar alguns ciclos, notando-se um abaixamento dos valores médios de humidade relativa de 16 a 19 de Dezembro, 22 a 25 de Dezembro, 15 de Janeiro a 24 de Fevereiro, voltando depois a descer de 16 a 29 de Março, de 2 a 4 de Abril e de 14 a 16 de Abril, sendo as restantes

quedas e subidas menos acentuadas. Ressalte-se que entre duas quedas se verifica um período de subida.

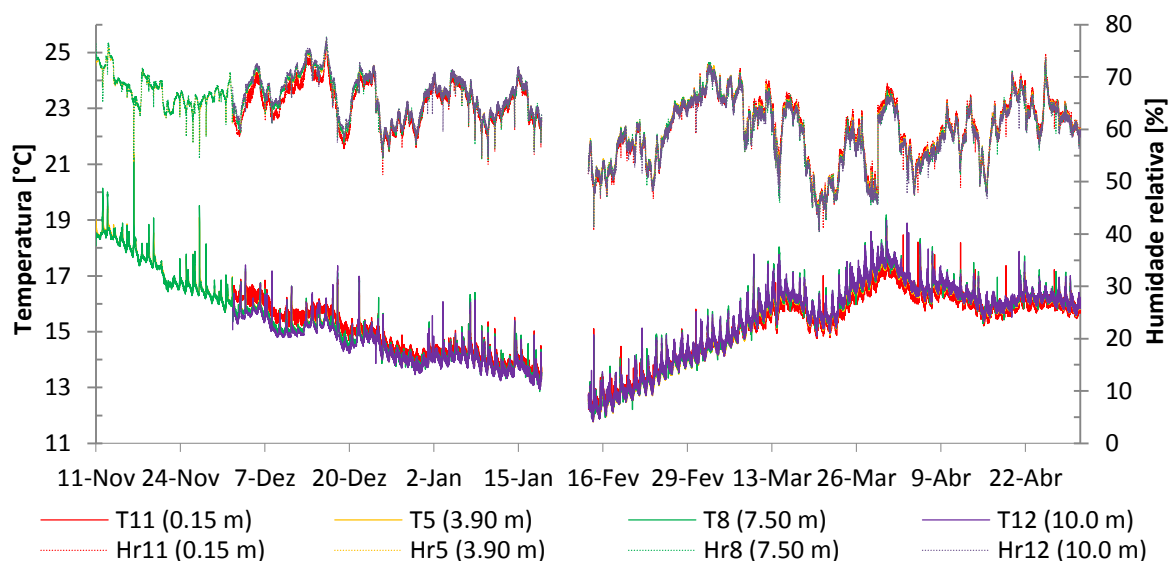


Figura 6.5 – Evolução da temperatura e humidade relativa numa coluna vertical colocada junto ao púlpito norte no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012

Na figura 6.6 apresenta-se a evolução da temperatura e da humidade relativa num corte transversal a passar pelos dois púlpitos, com o sensor T5 colocado junto do púlpito norte, o T6 a meio da nave e o T7 no púlpito sul. Os sensores encontram-se a uma altura de 3,90 m relativamente ao pavimento.

Os três sensores apresentam andamentos semelhantes, com pequenas variações de temperatura entre si.

Até dia 23 de Dezembro, nota-se que o sensor do púlpito norte apresenta valores superiores ao do púlpito sul, verificando-se a tendência para a zona norte da nave principal se encontrar a temperaturas mais elevadas. Isto pode-se justificar pelo facto de a zona norte ter uma menor ventilação por comparação com a zona sul. A zona sul contacta com a casa mortuária, que tem uma porta para o exterior que se abre várias vezes ao dia. Esta maior ventilação, em dias frios e pouco ensolarados, permite a entrada de massas de ar frio, alterando o microclima nas suas proximidades.

Verifica-se ainda que até este dia, o sensor colocado ao centro da nave apresenta valores médios muito próximos dos encontrados no púlpito norte e sul, mas com valores de pico, quer máximos quer mínimos, superiores a estes sensores.

A partir de dia 23 de Dezembro inverteu-se a tendência verificada anteriormente. Passou-se a observar valores de temperatura superiores para o sensor posicionado mais a sul. Isto justifica-se com o facto de a fachada sul apresentar uma maior exposição solar. O sensor ao centro da nave, apresenta valores médios inferiores aos outros dois, justificando-se este facto com a influência que a elevada inércia térmica das paredes exerce sobre os sensores na sua proximidade, tal como pela maior exposição que o sensor central apresenta a correntes de ar, aquando da abertura de portas e janelas. Este sensor, apesar do seu andamento médio ser inferior aos outros dois, apresenta picos máximos e mínimos superiores, o que se justifica, como se disse anteriormente, pela sua maior

exposição a correntes de ar e à presença humana, que se concentra em maior número na zona central da Igreja. Os sensores colocados nos púlpitos, por se encontrarem próximos das paredes, sofrem menos com os ciclos diários, quer de temperatura quer de humidade relativa.

Em termos de humidade relativa, como já se explicou, verifica-se o andamento inverso às variações de temperatura, com valores superiores para o sensor do púlpito sul face ao do púlpito norte até 23 de Dezembro, alterando-se a tendência a partir daqui. O sensor central apresenta valores intermédios até 23 de Dezembro, passando a registar valores mais elevados a partir daqui, visto apresentar temperaturas mais baixas. Contudo, estas diferenças são muito pequenas, e os valores registados nunca se aproximam, em qualquer dos pontos, das condições de saturação.

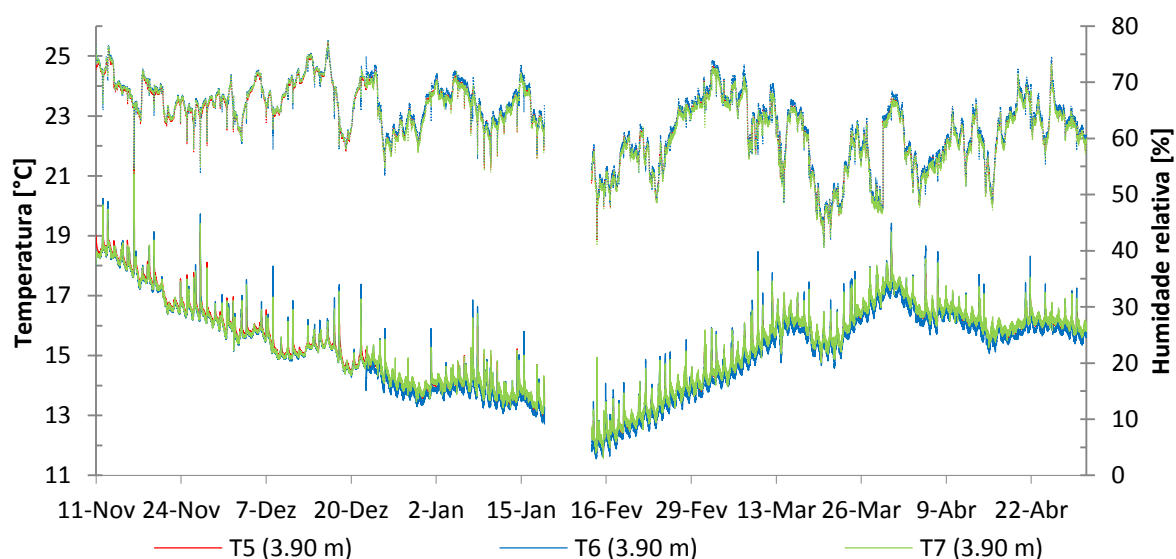


Figura 6.6 - Evolução da temperatura e humidade relativa na transversal que une os dois púlpitos no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012

Na figura 6.7 apresenta-se a evolução da temperatura e humidade relativa num corte longitudinal a passar pelo centro da nave principal. Utilizaram-se como referência quatro pontos, um no coro, outro na zona dos altares laterais mais próximos da entrada principal, um no alinhamento dos dois púlpitos e o quarto na entrada do altar-mor. Esta comparação pode-se considerar um pouco abusiva, pois os sensores limítrofes encontram-se a 5,30 m de altura, enquanto os dois sensores centrais se encontram a 3,90 m. Contudo, por questões arquitectónicas não foi possível colocar todos os sensores à mesma altura. Como tal, optou-se por não comparar todos os quatro sensores, mas sim dois a dois, separados por alturas.

Ressalte-se ainda que só existem leituras para todos os sensores a partir de 22 de Dezembro de 2011. Os valores até essa data são apresentados apenas com funções indicativas.

Começando pelos pontos situados a 3,90 m de altura e situados mais ao centro da Igreja, verifica-se que em termos de temperatura o sensor mais perto da entrada apresenta sempre valores médios superiores ao sensor central colocado no alinhamento dos dois púlpitos, o que se justifica pela maior proximidade que o primeiro sensor apresenta da porta principal de entrada. Todavia, seria de esperar que durante o período de Outono/Inverno, até Fevereiro, ocorresse o contrário, visto as temperaturas exteriores serem mais baixas e o sensor estar mais exposto às suas variações.

Em termos de humidade relativa, o andamento é similar mas inverso à temperatura, com o valor verificado na zona central a ser superior ao do sensor mais próximo da entrada, ainda que com pequenas diferenças.

Comparando agora os sensores colocados a 5,30 m, no coro e junto ao altar principal, verifica-se, em termos de temperaturas, que até 16 de Fevereiro o sensor colocado junto ao altar apresenta temperaturas superiores ao do coro, invertendo-se a tendência a partir desta data. Isto é explicável pelo facto de a maior proximidade ao exterior por parte do sensor colocado no coro, estando mais susceptível à influência do clima exterior. O sensor colocado junto ao altar está sob uma maior influência da inércia térmica e de uma menor ventilação.

No que respeita à humidade relativa, as tendências mantêm-se iguais, invertendo-se apenas o sentido. A humidade relativa aumenta com a diminuição da temperatura, ainda que com diferenças reduzidas.

Verifica-se assim a tendência da zona mais interior apresentar temperaturas mais elevadas e consequentemente humidades relativas mais baixas durante o Outono/Inverno, até 16 de Fevereiro. A partir daqui regista-se uma inversão, passando a temperatura da zona colocada junto à entrada a ser superior, no período correspondente à Primavera/Verão.

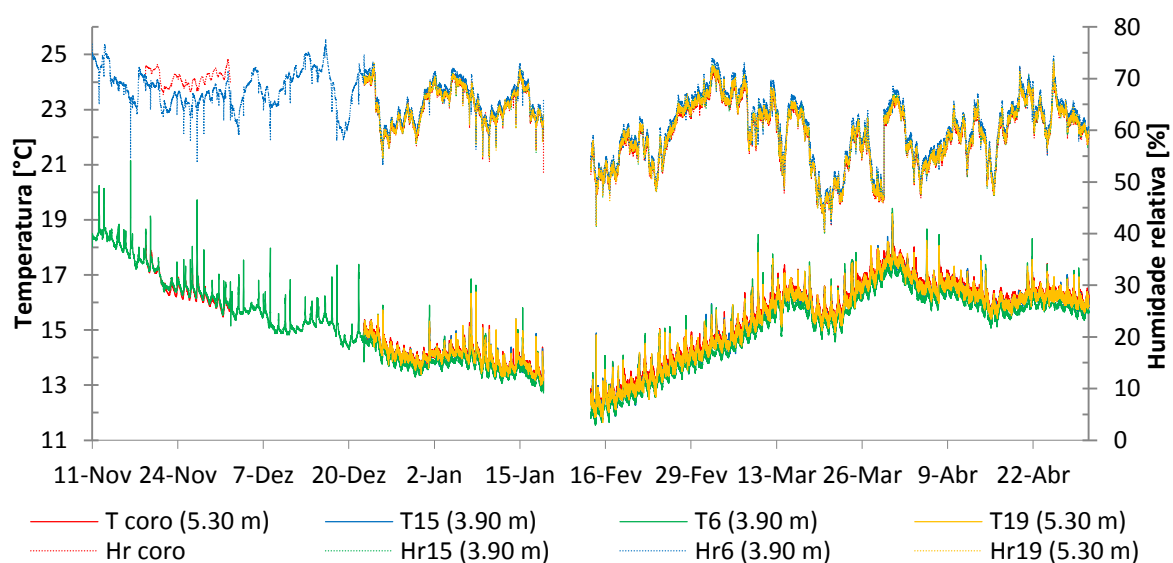


Figura 6.7 - Evolução da temperatura e humidade relativa na longitudinal da nave principal no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012

De seguida apresenta-se a comparação entre os valores de temperatura e humidade relativa obtidos para a superfície da parede que se encontra junto ao púlpito norte e as mesmas condições referentes ao ar.

Apesar de se terem monitorizado as condições superficiais para dois pontos no pavimento e dois na parede, um a 1,50 e outro a 3,90 m de altura, optou-se pela utilização deste último ponto por ser o que apresenta valores de temperatura e humidade relativa mais díspares das condições do ar. Isto justifica-se pelo facto de sob o pavimento se encontrar um antigo cemitério, com a possível existência de bolsas de ar que alteram por completo os processos de transferência de calor entre a

superfície deste e o solo. Outro factor a ter em conta é o facto de os sensores ao estarem colocados no pavimento ficarem demasiado expostos aos ocupantes, que podem inadvertidamente contribuir de forma negativa para a sua boa manutenção.

Como se pode observar na figura 6.8 até 30 de Dezembro as temperaturas superficiais apresentam valores médios superiores às da temperatura do ar, como era esperado, dada a elevada inércia térmica da parede, observando-se um maior atraso e amortecimento dos ciclos sazonais. A partir desta data as temperaturas superficiais apresentam ciclos menores que a temperatura do ar, passando a observar-se que o paramento da parede atinge temperaturas inferiores às do ar circundante.

Em relação à humidade relativa verifica-se o inverso. Seria de esperar que no período da Primavera, quando as temperaturas superficiais são inferiores às do ar e a humidade relativa exterior aumenta, ocorressem processos de condensações superficiais. Contudo, tal não se verificou.

As humidades relativas interiores, tanto superficiais como do ar nunca ultrapassaram os 80%. Tal pode-se justificar pelo ano anormalmente seco, onde os meses de Dezembro a Fevereiro apresentaram valores de precipitação muito baixos. As temperaturas medidas apresentaram valores semelhantes aos verificados nos últimos três anos e aos valores médios da normal climatológica de 1971/2000, tendo-se mesmo verificado a temperatura média mínima mais baixa dos últimos três anos e abaixo da normal para os meses de Fevereiro, Março e Abril, não conduzindo mesmo assim uma redução da temperatura interior suficiente para levar a um aumento brusco da humidade relativa interior que pudesse constituir risco de saturação. Outra justificação prende-se com o facto de a parede escolhida para o controlo das condições superficiais não se encontrar em contacto com o exterior, mas sim com a sacristia. Por motivos logísticos não foi possível monitorizar uma parede exterior.

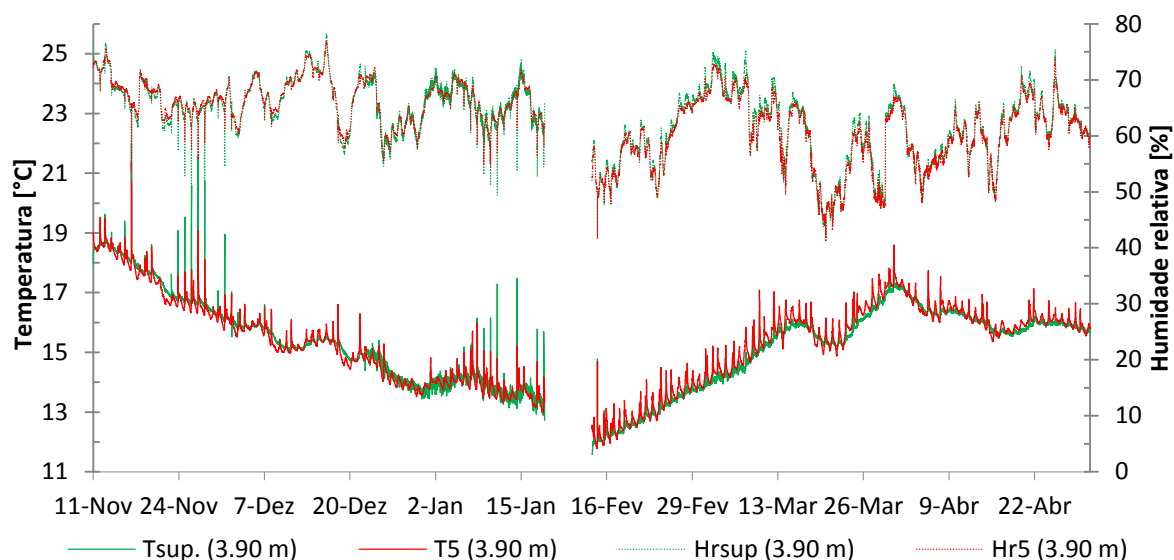


Figura 6.8 - Evolução da temperatura e humidade relativa do ar e superficial no período compreendido entre 11 e Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012

6.2. Resultados por estação do ano

Depois de se terem analisado os dados de forma global na secção 6.1, apresentam-se agora divididos por estações do ano, tendo em vista que o estudo abrangeu o Outono, Inverno e Primavera. Optou-se pela apresentação de uma semana por cada estação, com início ao domingo e término ao sábado, com uma escala mais fina que na secção 6.1, sendo assim possível visualizar os ciclos diários e ter uma maior percepção dos vários fenómenos. Para o Outono utilizou-se a semana de 4 a 10 de Dezembro, por se encontrar no final desta estação, sendo assim possível observar a influência que ela teve sobre o edifício. Para o Inverno utilizou-se a semana de 19 a 23 de Fevereiro, que coincide com a inversão da tendência de diminuição da temperatura. Para a Primavera utilizou-se a semana de 22 a 28 de Abril, por ser a semana mais próxima do final das leituras, de modo a poder fornecer resultados face à influência desta estação sobre a Igreja.

6.2.1. Outono

Da análise da figura 6.9, que compara as temperaturas no exterior, no desvão da cobertura e no interior da Igreja, observa-se facilmente que os valores obtidos no desvão e no interior acompanham o andamento das temperaturas exteriores, apesar de apresentarem ciclos menos sinuosos. Denota-se a influência da inércia térmica, principalmente no interior, que ainda se mantém sob influência das temperaturas elevadas ocorridas no período de Primavera/Verão.

Na tabela 6.1 pode-se observar o horário em que ocorreram as temperaturas mínimas e máximas no exterior, no desvão e no interior. Conjugando a informação constante na figura 6.9 e na tabela 6.1, relativamente à temperatura exterior e no desvão da cobertura, verifica-se a influência da resistência térmica da cobertura, pois os seus ciclos são mais ténues do que os verificados no exterior. Verifica-se também a influência da inércia térmica pelo desfasamento e amortecimento ocorrido entre os picos mínimos e máximos, notando-se na generalidade dos casos um atraso para o desvão, que pode ser menos notório para os dias nublados, onde se verificam menores variações na temperatura exterior, em consequência da menor radiação solar.

No que respeita às condições interiores, os picos negativos são praticamente insignificantes, verificando-se que os máximos coincidem com o período de abertura e celebrações religiosas da Igreja. De terça a sábado a Igreja abre às 17:00 h, celebrando a missa às 18:30 h e encerrando às 19:30 h. Aos domingos abre às 11:00 h, celebra a missa às 12:00 h e encerra às 13:00 h e às segundas encontra-se encerrada.

Pela análise da tabela 6.1 observa-se que só na quinta-feira, dia 8, é que tal não se verifica, e na segunda-feira, dia 5, em que a Igreja se encontra fechada. Conclui-se assim que dada a elevada inércia térmica do edifício, a variação da temperatura exterior tem uma influência reduzida nos ciclos diários interiores, com os picos positivos a deverem-se sobretudo à presença humana.

No que se refere à humidade relativa pode-se observar através da figura 6.10 que é no desvão da cobertura onde se encontram os valores médios mais elevados, não estando sujeita aos picos de maior amplitude do exterior. Isto deve-se ao facto de ser um espaço fechado e pouco ventilado, mantendo elevados níveis de vapor de água no seu interior e apresentando alguns pontos com valores acima dos 95%, que no entanto não atingem a saturação.

No interior, a humidade relativa apresenta-se compreendida entre os 58 e os 72,1 %, com pequenas variações ao longo da semana e com os picos máximos a coincidirem com os mínimos de temperatura e o inverso para os picos mínimos. Apesar de se verificarem valores perto da saturação no exterior, especialmente para os dias compreendidos entre 8 e 10 de Dezembro, a humidade relativa interior mantém-se constante, o que denota uma fraca ventilação e um microclima muito estável.

Tabela 6.1 – Temperaturas máximas e mínimas observadas no exterior, interior da Igreja e desvão da cobertura no período compreendido entre 4 e 10 de Dezembro de 2011 - Outono

Dia	Horas a que se verificam as temperaturas mínima/máxima		
	Exterior [h]	Desvão [h]	Interior [h]
4	4:00/13:00	0:40/17:50	0:30/12:20
5	4:00/15:00	6:20/17:00	5:30/16:30
6	8:00/13:00	10.30/15:40	1:20/18:40
7	7:00/14:00	11:10/17:30	8:20/18:40
8	8:00/23:50	8:30/14:40	23:20/12:30
9	5:00/13:00	8:30/17:50	5:30/18:20
10	3:00/16:00	4:30/17:20	3:20/19:00

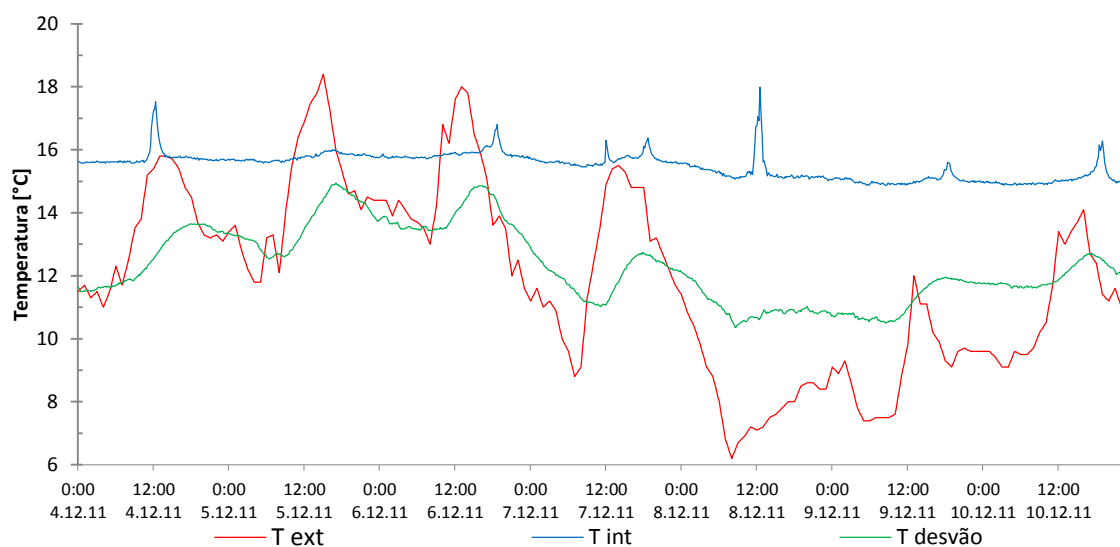


Figura 6.9 - Evolução da temperatura no exterior, interior da Igreja e desvão da cobertura no período compreendido entre 4 e 10 de Dezembro de 2011 – Outono

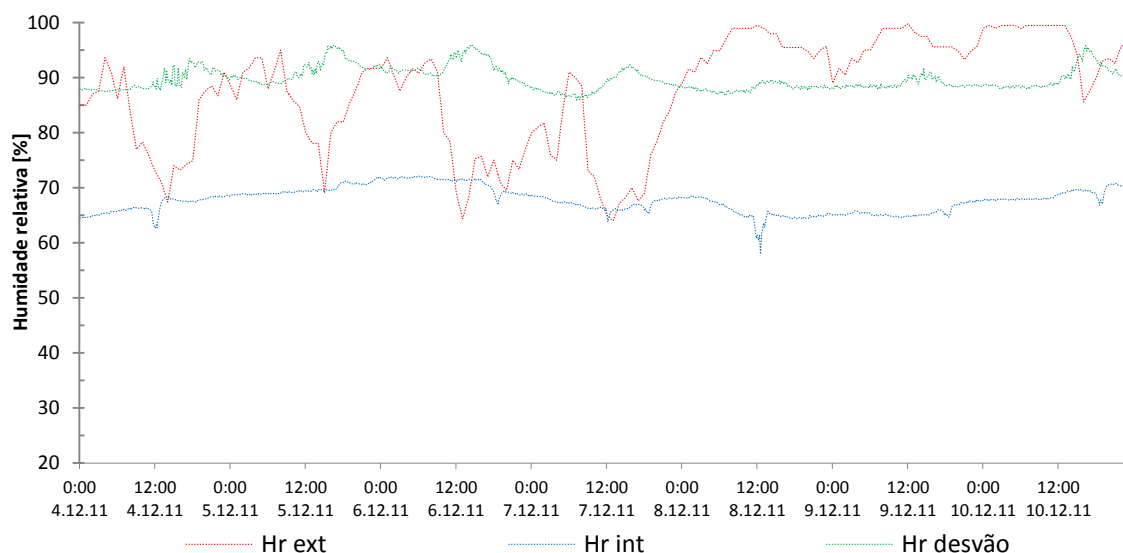


Figura 6.10 - Evolução da humidade relativa no exterior, interior da Igreja e desvão da cobertura no período compreendido entre 4 e 10 de Dezembro de 2011 - Outono

Na figura 6.11 apresentam-se os valores de temperatura e humidade relativa comparando pontos a diferentes alturas, respectivamente 0,15 m, 3,90 m, 7,50 m e 10,00 m, como já se tinha visto para a figura 6.5. Desta vez, porém, utilizou-se um período de tempo reduzido a 7 dias e com uma escala mais fina, facilitando a percepção dos fenómenos desenvolvidos.

Relativamente à temperatura, observa-se que os valores mais elevados encontram-se junto ao pavimento, diminuindo progressivamente até ao sensor colocado junto ao tecto. Isto justifica-se pelo facto do pavimento se encontrar a temperaturas superiores, que guarda desde o período de Primavera/Verão precedente, devido ao seu contacto com o solo, perdendo a energia acumulada de forma lenta e gradual, enquanto a cobertura, em contacto com o exterior, se encontra sujeita à redução da temperatura que se veio a verificar.

Conclui-se então que o ar não se apresenta estratificado, apresentando correntes convectivas, pois o ar quente em contacto com o pavimento sobe e ao encontrar as temperaturas mais baixas junto da cobertura ganha densidade e desce.

No que respeita à humidade relativa, verifica-se uma disposição inversa à da temperatura, com o valor mais elevado junto ao tecto, onde o ar é mais frio, e o valor mais baixo junto ao pavimento, onde o ar se encontra mais quente.

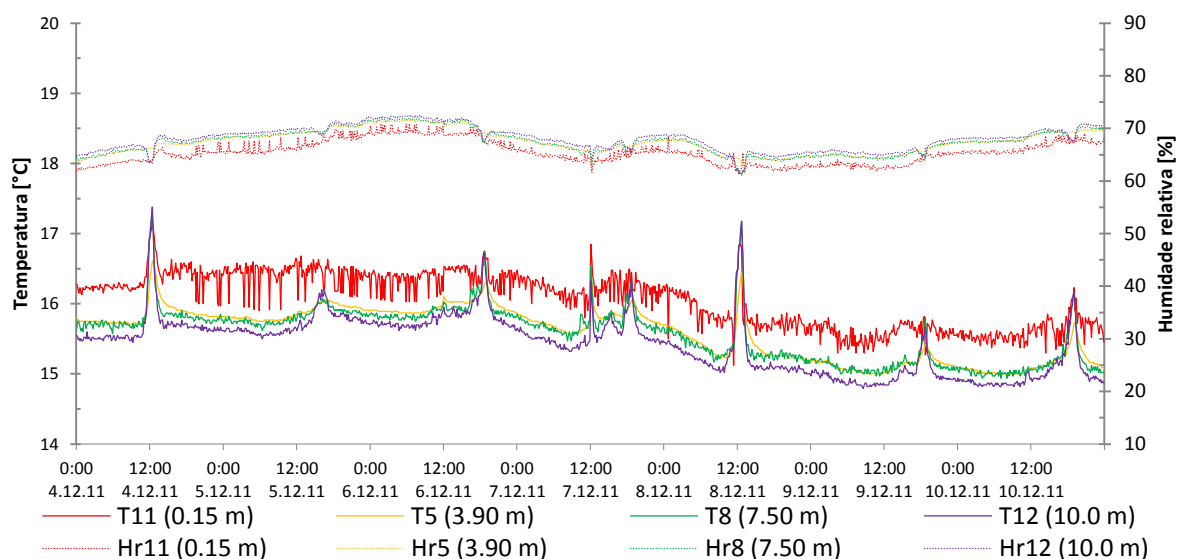


Figura 6.11 - Evolução da temperatura e humidade relativa numa coluna vertical colocada junto ao púlpito norte no período compreendido entre 4 e 10 de Dezembro de 2011 - Outono

Na figura 6.12 apresenta-se a comparação entre os valores de temperatura e humidade relativa para uma superfície e para o ar a uma altura de 3,90 metros.

Como se avançou no ponto 6.1, para este período as temperaturas superficiais médias apresentam valores superiores aos do ar, dada a energia acumulada pelas paredes de grande massa durante a Primavera, verificando-se ocasionalmente alguns pontos em que os seus valores baixam, mas mantendo diferenças mínimas. As humidades relativas também se apresentam muito próximas, com ordem inversa, com valores máximos abaixo dos 75 %, longe de constituírem perigo de condensação.

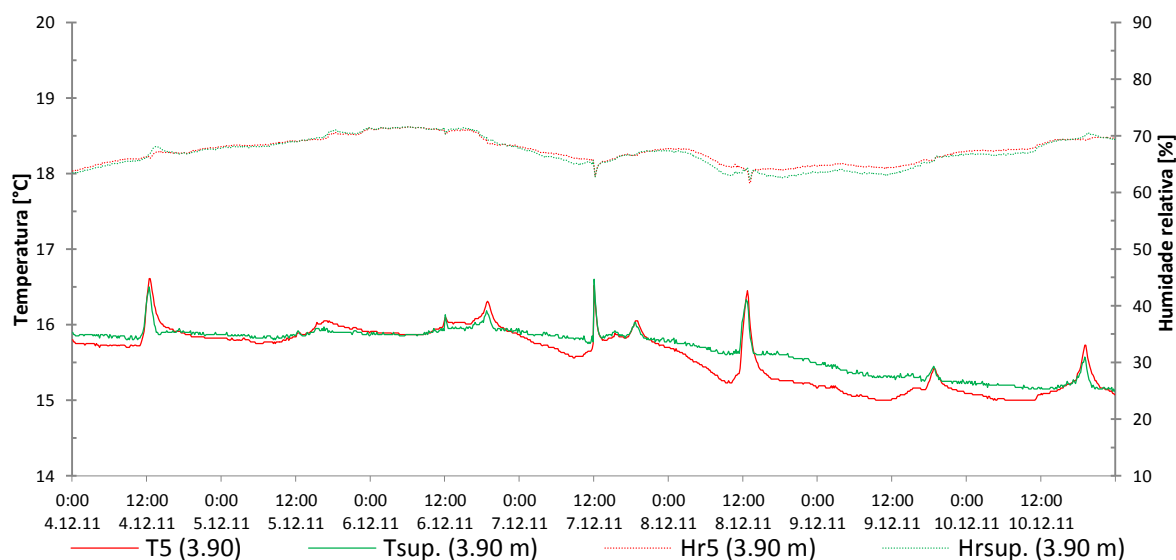


Figura 6.12 - Evolução da temperatura e humidade relativa do ar e superficial no período compreendido entre 4 e 10 de Dezembro de 2011 – Outono

6.2.2. Inverno

Da análise da figura 6.13, que compara as temperaturas no exterior, no desvão da cobertura e no interior da Igreja, observa-se facilmente que os valores obtidos no desvão e no interior acompanham o andamento das temperaturas exteriores, apesar de apresentarem ciclos menos sinuosos, notando-se a influência da inércia térmica, principalmente para o caso do interior, com o amortecimento e atraso dos ciclos. O desvão, apesar de ter ciclos menos sinuosos, apresenta uma temperatura média inferior à do exterior, o que se justifica pelo facto de a sua inércia térmica para os ciclos sazonais já ter sido vencida, ter uma fraca ventilação e pela opacidade da cobertura não lhe permitir a absorção total da radiação solar.

Na tabela 6.2 pode-se observar o horário em que ocorreram as temperaturas mínimas e máximas no exterior, no desvão e no interior. Conjugando a informação que consta na figura 6.13 e na tabela 6.2, relativamente à temperatura exterior e no desvão da cobertura, verifica-se a influência da resistência térmica da cobertura, visto os seus ciclos serem mais ténues do que os verificados no exterior. Verifica-se também a influência da inércia térmica, que apesar de, como se referiu anteriormente, já ter sido vencida em relação aos ciclos sazonais, ainda se apresenta importante para os ciclos diários, proporcionando o desfasamento ocorrido entre os picos mínimos e máximos, notando-se para todos os sete dias um atraso para o desvão.

No que respeita às condições interiores, os picos negativos são praticamente insignificantes, verificando-se que os máximos coincidem com o período de abertura e celebrações religiosas da Igreja, como já se disse no ponto 6.2.1.

Pela análise da tabela 6.2 observa-se que só na terça-feira, dia 21, e sexta-feira, dia 24, é que os picos positivos ocorrem depois do encerramento da Igreja, às 22:50 h e 23:20 h, respectivamente. Contudo, verificaram-se para os dois dias picos positivos por volta das 19:00 h, como se pode confirmar na figura 6.13, apesar de apresentarem valores mais baixos. Para o dia que a Igreja se encontra fechada ao público, a temperatura máxima, tal como se verificou para o Outono, ocorre perto das 16:30 h. Conclui-se assim, também para o período de Inverno, que dada a elevada inércia térmica do edifício a variação da temperatura exterior tem uma influência reduzida nos ciclos diários interiores, com os picos positivos a deverem-se sobretudo à presença humana.

No que se refere à humidade relativa, pode-se observar através da figura 6.14 que no desvão da cobertura encontram-se os valores médios mais elevados, apresentando valores mais uniformes do que no exterior. Isto deve-se ao facto de ser um espaço fechado e pouco ventilado, mantendo elevados níveis de vapor de água no seu interior. No entanto apresenta valores inferiores aos verificados no Outono, com as humidades relativas máximas a rondarem os 80%.

No interior a humidade relativa apresenta-se compreendida entre os 48 e os 63 %, coincidindo os picos máximos com os mínimos de temperatura e o inverso para os picos mínimos.

Tabela 6.2 – Temperaturas máximas e mínimas observadas no exterior, no interior da Igreja e no desvão da cobertura no período compreendido entre 19 e 25 de Fevereiro de 2012 - Inverno

Dia	Horas a que se verificam as temperaturas mínima/máxima		
	Exterior [h]	Desvão [h]	Interior [h]
19	5:40/16:50	10:10/17:30	4:50/12:20
20	7:30/17:00	10:20/18:40	8:50/16:20
21	7:00/17:10	8:50/17:40	7:10/22:50
22	8:40/16:40	9:20/18:40	6:40/19:50
23	8:00/17:30	10:20/19:00	8:10/18:30
24	7:50/17:10	8:20/19:00	7:30/23:20
25	8:00/15:30	10:00/18:30	8:10/18:50

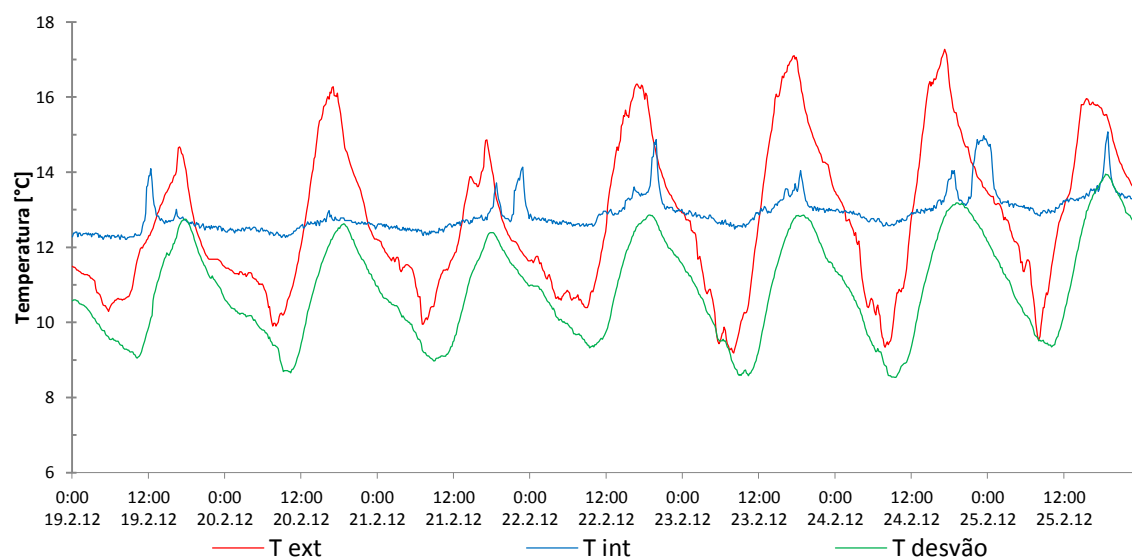


Figura 6.13 - Evolução da temperatura no exterior, interior da Igreja e desvão da cobertura no período compreendido entre 19 e 25 de Fevereiro de 2012 – Inverno

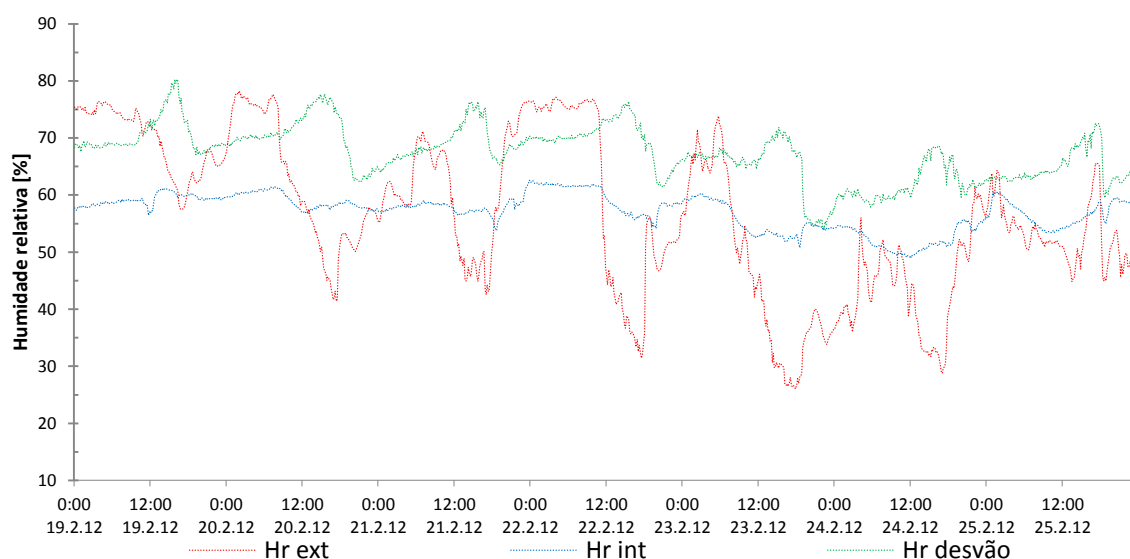


Figura 6.14 - Evolução da humidade relativa no exterior, interior da Igreja e desvão da cobertura no período compreendido entre 19 e 25 de Fevereiro de 2012 - Inverno

Na figura 6.15 apresentam-se os valores de temperatura e de humidade relativa comparando pontos a diferentes alturas, respectivamente 0,15 m, 3,90 m, 7,50 m e 10,00 m, como já se tinha visto para a figura 6.5, mas desta vez para um período de tempo reduzido a 7 dias e com uma escala mais fina, sendo assim mais fácil perceber os fenómenos desenvolvidos.

Relativamente à temperatura, observa-se que os valores mais elevados continuam a encontrar-se junto ao pavimento, mas começa-se a verificar uma inversão dos valores, com a temperatura aos 10,00 m a ser superior à dos 7,50 m e esta à dos 3,90 m, verificando-se a tendência para se alcançar uma estratificação do ar por temperaturas num futuro próximo. O pavimento sujeito a uma forte inércia térmica fornecida pelo contacto com o solo ainda se encontra sob efeito das reservas de calor do período de Primavera/Verão, influenciando assim o sensor que se encontra mais próximo de si. Porém, as temperaturas exteriores já se encontram a aumentar, contribuindo para o consequente aumento da temperatura da cobertura, que começa a influenciar os sensores colocados nos patamares abaixo de si.

Conclui-se então que ainda existem correntes convectivas, mas com uma menor actividade e com a tendência para se atingir a estratificação do ar por temperaturas, pois a temperatura da cobertura aproximou-se da temperatura do pavimento.

No que respeita à humidade relativa, verifica-se uma disposição inversa à da temperatura, encontrando-se o valor mais elevado no patamar dos 3,90 metros, onde o ar é mais frio, e o valor mais baixo junto ao pavimento, onde o ar ainda se encontra mais quente.

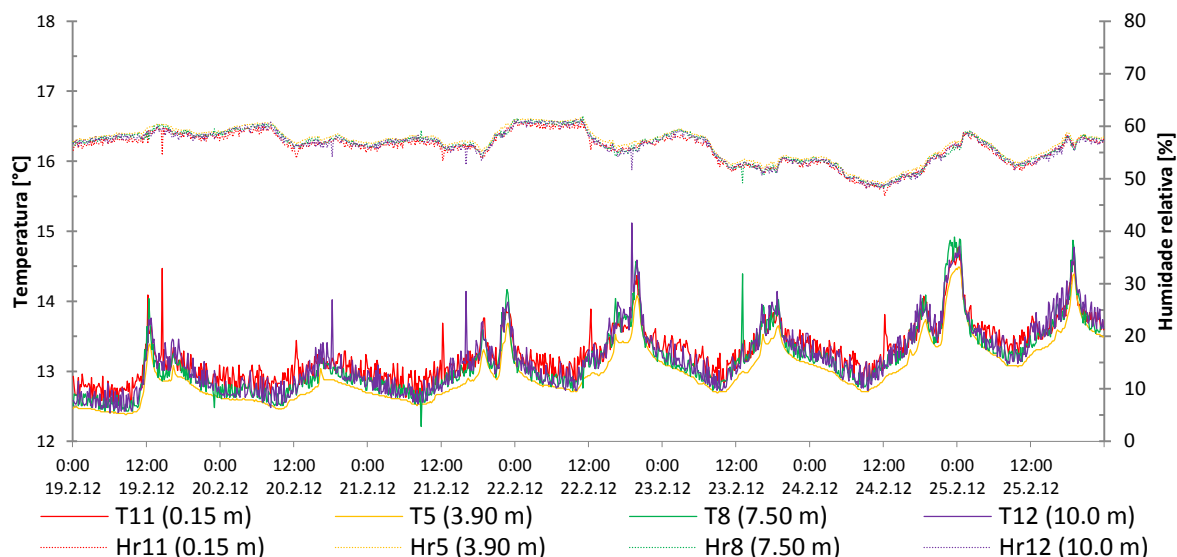


Figura 6.15 - Evolução da temperatura e humidade relativa numa coluna vertical colocada junto ao púlpito norte no período compreendido entre 19 e 25 de Fevereiro de 2012 - Inverno

Na figura 6.16 apresenta-se a comparação entre os valores de temperatura e humidade relativa para uma superfície e para o ar a uma altura de 3,90 m.

Como se avançou na secção 6.1, para este período as temperaturas superficiais médias já apresentam valores inferiores aos do ar, tendo-se esgotado o atraso térmico proporcionado pela elevada massa das paredes, que começam agora a estar sujeitas às temperaturas frias que antecederam este período. Continuam a verificar-se diferenças reduzidas.

As humidades relativas apresentam-se também muito próximas, com ordem inversa, com valores máximos abaixo dos 65 %. Apesar das temperaturas superficiais se encontrarem abaixo das do ar, esta diferença não é suficiente para que as massas de ar ao se aproximarem da parede baixem de tal forma a temperatura que possam conduzir a um aumento significativo dos valores de humidade relativa.

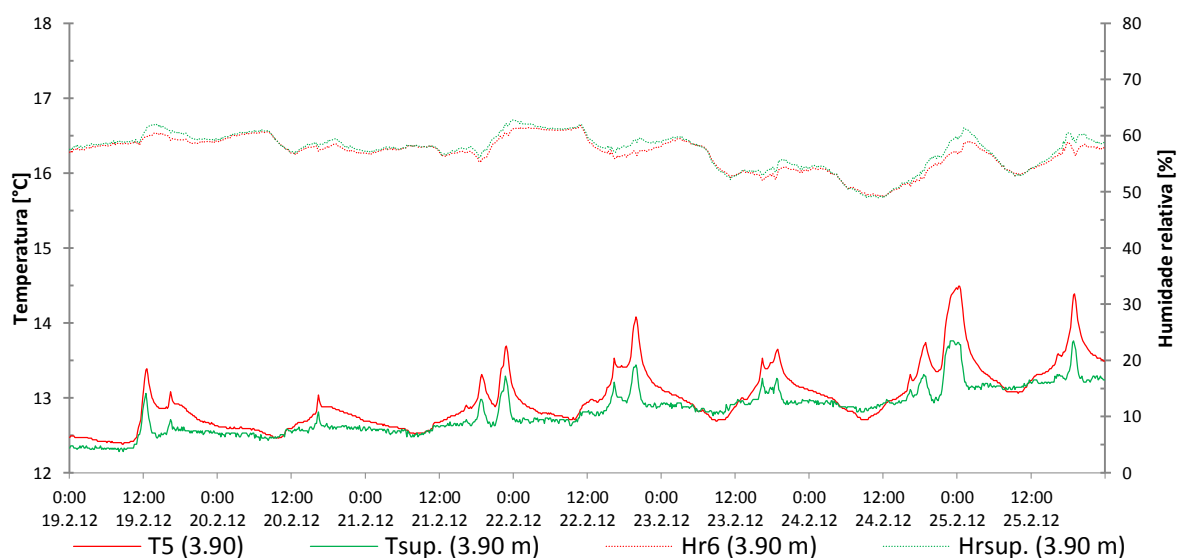


Figura 6.16 - Evolução da temperatura e humidade relativa do ar e superficial no período compreendido entre 19 e 25 de Fevereiro de 2012 - Inverno

6.2.3. Primavera

Da análise da figura 6.17, que compara as temperaturas no exterior, no desvão da cobertura e no interior da Igreja, observa-se facilmente que os valores obtidos no desvão e no interior acompanham o andamento das temperaturas exteriores, apesar de apresentarem ciclos menos sinuosos, notando-se a influência da inércia térmica, principalmente para o caso do interior, com o amortecimento e atraso dos ciclos. No desvão, apesar dos ciclos menores, apresenta-se uma temperatura média inferior à do exterior, o que se justifica pelo facto de a sua inércia térmica já ter sido vencida em parte, de ter uma fraca ventilação e pela opacidade da cobertura não lhe permitir a absorção total da radiação solar, dando-se a transferência de calor essencialmente por condução.

Na tabela 6.3 pode-se observar o horário em que ocorreram as temperaturas mínimas e máximas no exterior, no desvão e no interior. Conjugando a informação que consta na figura 6.17 e na tabela 6.3, relativamente à temperatura exterior e no desvão da cobertura, verifica-se a influência da resistência térmica da cobertura, visto os seus ciclos serem mais ténues do que os verificados no exterior. Verifica-se também a influência da inércia térmica, que apesar de como se disse em cima, já ter sido vencida em certa parte, ainda apresenta alguma importância para os ciclos diários, proporcionando o desfasamento ocorrido entre os picos mínimos e máximos. Observa-se para todos os 7 dias um atraso para o desvão.

No que respeita às condições interiores, os picos negativos são praticamente insignificantes, com os máximos a coincidirem com o período de abertura e celebrações religiosas da Igreja, como já se disse nas secções 6.2.1. e 6.2.2.

Pela análise da tabela 6.3 verifica-se que os picos positivos acontecem sempre durante o período de abertura. Para o dia em que a Igreja se encontra fechada ao público, verificou-se um atraso relativamente aos períodos de Outono e Inverno, justificando-se com a troca horária ocorrida a 25 de Março e com o facto de nesta altura do ano o planeta se encontrar mais próximo do Sol, o que proporciona mais horas de exposição solar por dia.

Volta-se a constatar que os ciclos interiores são principalmente influenciados pela presença humana, notando-se que a elevada inércia térmica do edifício não o deixa exposto aos ciclos diários exteriores.

No que se refere à humidade relativa, pode-se observar através da figura 6.18 que no desvão da cobertura encontram-se os valores médios mais elevados, com valores mais uniformes do que no exterior. Isto deve-se ao facto de ser um espaço fechado e pouco ventilado, mantendo elevados níveis de vapor de água no seu interior. Contudo, apresenta valores inferiores aos verificados no Outono e em termos médios semelhantes aos do Inverno, mas com menores variações, com as humidades relativas máximas a rondarem os 80%.

No interior a humidade relativa apresenta-se compreendida entre os 55 e os 75 %. Verifica-se para este período uma maior oscilação de valores, comparativamente ao Outono e Inverno, estando o ambiente interior mais exposto aos ciclos exteriores. Nesta altura do ano, em que as temperaturas se encontram em subida, o clima torna-se mais ameno e sente-se a necessidade de abrir as janelas, aumentando a ventilação e tornando o edifício mais dependente das condições exteriores. Apesar de

o mês de Abril ter sido o mais frio dos últimos 12 anos, apresentou valores de insolação acima da normal climatológica, ainda que não se tenham verificado humidades relativas exteriores acima dos 80%.

Tabela 6.3 – Temperaturas máximas e mínimas observadas no exterior, interior da Igreja e desvão da cobertura no período compreendido entre 22 e 28 de Abril de 2012 - Primavera

Dia	Horas a que se verificam as temperaturas mínima/máxima		
	Exterior [h]	Desvão [h]	Interior [h]
22	4:40/18:10	9:00/16:20	4:40/12:20
23	2:20/18:00	9:10/18:40	3:20/18:10
24	8:00/18:30	8:30/20:10	7:40/18:40
25	19:40/14:20	3:30/14:00	21:20/18:40
26	6:30/15:20	7:10/16:20	3:50/18:30
27	5:30/18:40	9:00/16:30	4:40/18:40
28	10:00/17:20	7:40/17:40	10:30/19:00

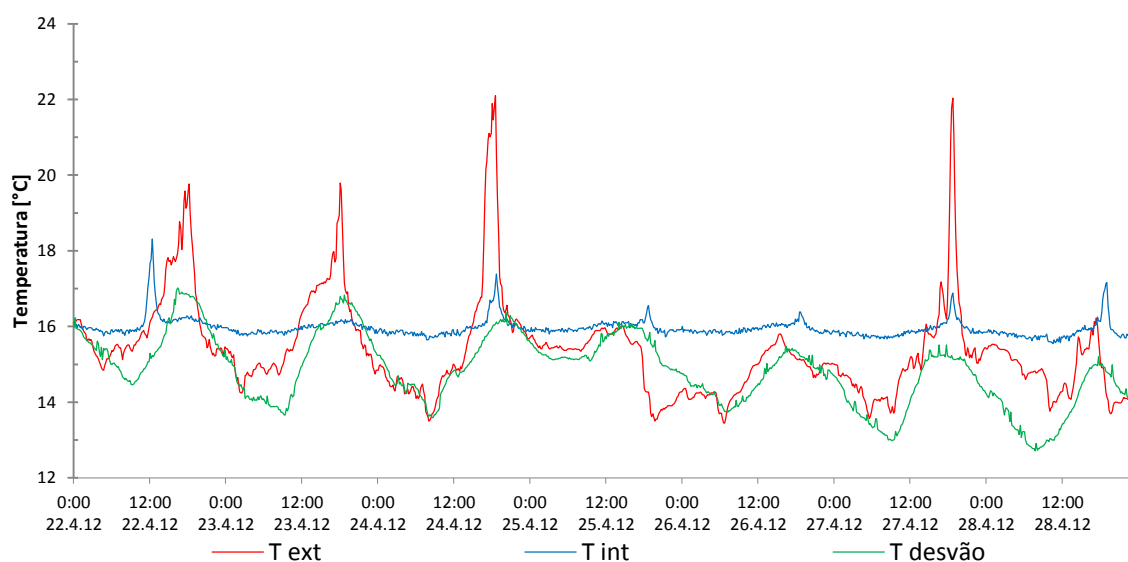


Figura 6.17 - Evolução da temperatura no exterior, interior da Igreja e desvão da cobertura no período compreendido entre 22 e 28 de Abril de 2012 – Primavera

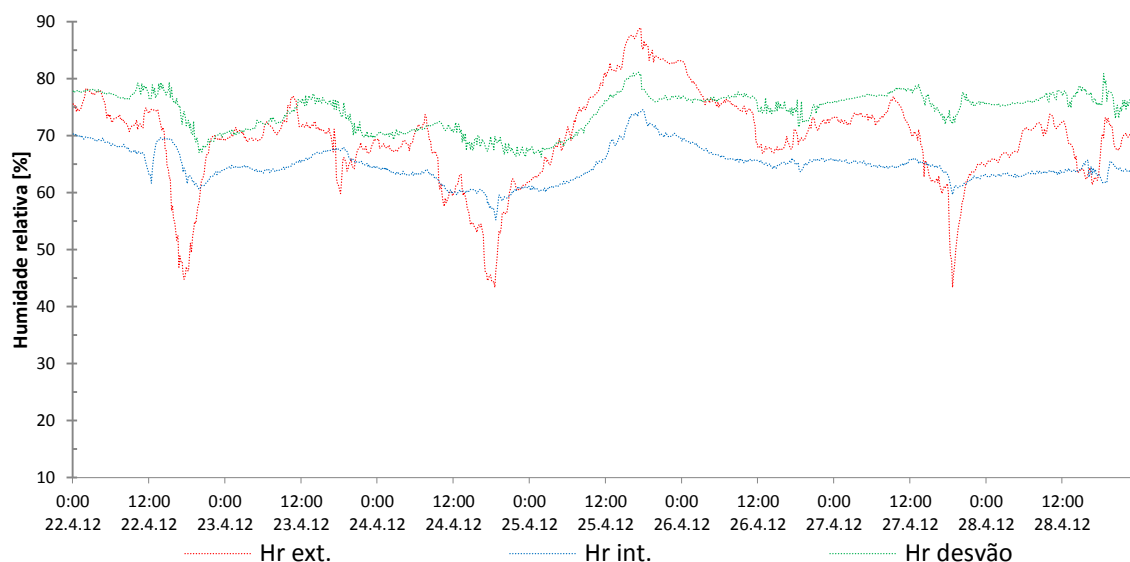


Figura 6.18 - Evolução da humidade relativa no exterior, interior da Igreja e desvão da cobertura no período compreendido entre 22 e 28 de Abril de 2012- Primavera

Na figura 6.19 apresentam-se os valores de temperatura e humidade relativa comparando pontos a diferentes alturas, respectivamente 0,15 m, 3,90 m, 7,50 m e 10,00 m, como já se tinha visto na figura 6.5, mas desta vez para um período de tempo reduzido a 7 dias e com uma escala mais apertada, sendo assim mais fácil perceber os fenómenos desenvolvidos.

Relativamente à temperatura, observa-se que para este período já ocorreu a inversão de temperaturas avançada no ponto 6.2.2, com os valores mais elevados a registarem-se junto ao tecto, vindo a diminuir gradualmente até ao sensor colocado junto ao pavimento. Nota-se que o ar encontra-se separado por temperaturas, denotando-se a sua estratificação e ausência de correntes convectivas. Isto era esperado para o início da Primavera, dado o aumento das temperaturas médias exteriores e pelo facto de o atraso térmico provocado pela elevada inércia das paredes e solo subjacente ter sido vencido, estando agora sujeito às temperaturas baixas do período de Outono/Inverno antecedente. Esta estratificação favorece o processo de conservação de acervos, artefactos e outros materiais, pois anula as correntes convectivas e, consequentemente, a movimentação de poeiras e outros poluentes.

No que respeita à humidade relativa, verifica-se uma disposição inversa à da temperatura, com o valor mais elevado junto ao pavimento, onde o ar é mais frio, e o valor mais baixo junto ao tecto, onde o ar ainda se encontra mais quente.

Na figura 6.20 apresenta-se a comparação entre os valores de temperatura e humidade relativa para uma superfície e para o ar a uma altura de 3,90 m.

Como se avançou na secção 6.1, para este período as temperaturas superficiais médias continuam a apresentar valores inferiores aos do ar, tal como verificado na figura 6.16.

As humidades relativas também se apresentam muito próximas, com ordem inversa, com valores máximos abaixo dos 75 %. Apesar de as temperaturas superficiais se encontrarem abaixo das do ar, esta redução não é suficiente para que as massas de ar, ao aproximarem-se da parede, baixem de tal

forma a temperatura e consequentemente aumentem significativamente os valores de humidade relativa, o que se pode justificar pelo facto de os valores de humidade relativa exterior não se aproximarem dos valores de saturação, ainda que Abril tenha sido o mês que atingiu maiores níveis de precipitação desde Novembro, pela fraca ventilação do edifício e pelo facto de se ter estado perante um ano mais seco que o normal.

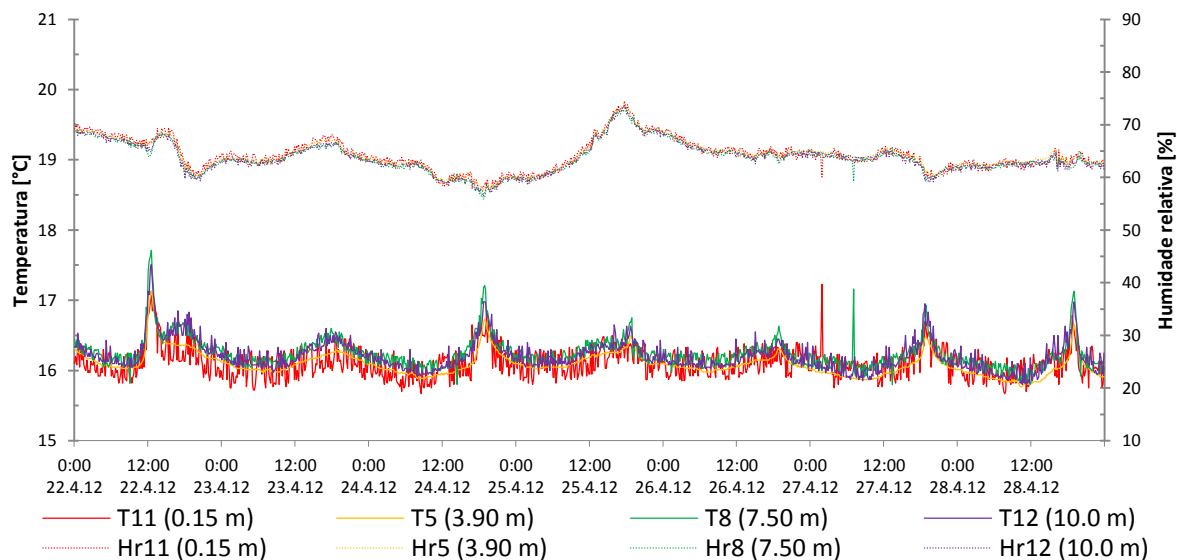


Figura 6.19 - Evolução da temperatura e humidade relativa numa coluna vertical colocada junto ao púlpito norte no período compreendido entre 22 e 28 de Abril de 2012 - Primavera

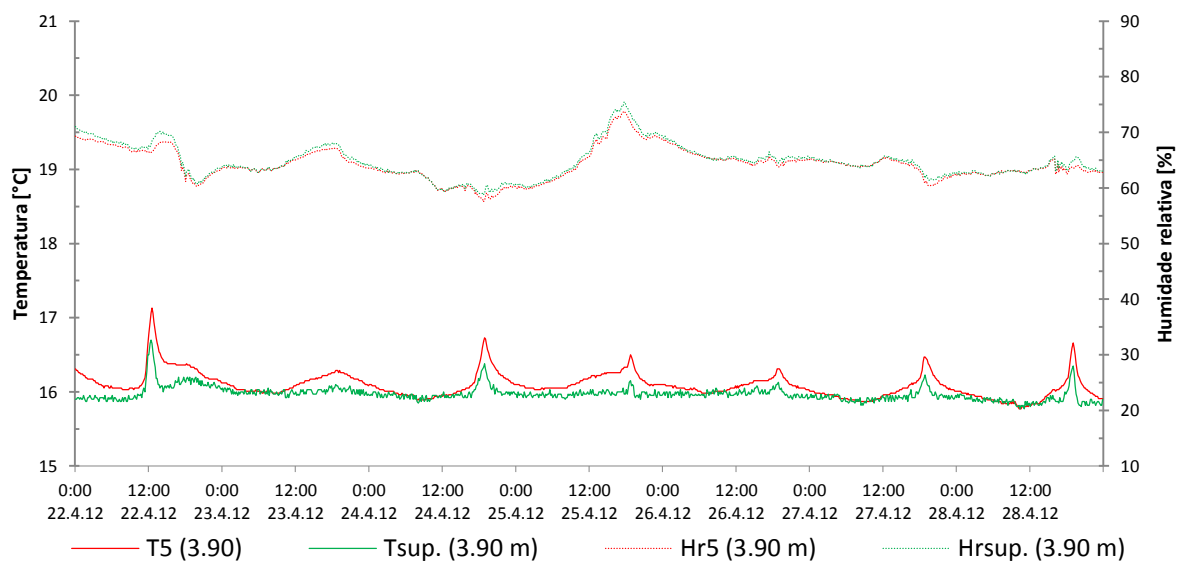


Figura 6.20 - Evolução da temperatura e humidade relativa do ar e superficial no período compreendido entre 22 e 28 de Abril de 2012 – Primavera

6.3. Amplitudes diárias de temperatura e humidade relativa

Como se avançou na secção 4.3, não é possível definir valores ideais para a correcta conservação de diversos materiais para diferentes localizações, apesar de se encontrarem na literatura alguns valores de referência tabelados.

No entanto, é frequente encontrar limites para os ciclos diários de temperatura e humidade relativa, acima dos quais a correcta conservação dos diversos artefactos e materiais pode ser posta em causa. É comum utilizar o limite de 3,2°C para a temperatura e 7% para a humidade relativa, considerando-se que se entra numa situação desvantajosa para a conservação quando se ultrapassa o dobro destes valores.

Nas figuras 6.21 e 6.22 apresentam-se as amplitudes verificadas para os ciclos diários de temperatura e humidade relativa, respectivamente, e os seus limites recomendados para o interior do edifício no período compreendido entre 12 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012. Exceptua-se o período de 24 de Janeiro a 14 de Fevereiro de 2012 devido a avaria no sistema de monitorização e no dia 8 de Março de 2012, por se ter utilizado o aparelho em questão para efectuar a monitorização manual da Igreja.

Na figura 6.21 observam-se os ciclos de temperatura, de onde se pode concluir, tal como já se tinha mencionado nas secções 6.1 e 6.2, a constância dos valores verificados. As amplitudes encontradas nunca se aproximam do valor limite de 3,2°C, verificando-se uma amplitude máxima de 1,6°C.

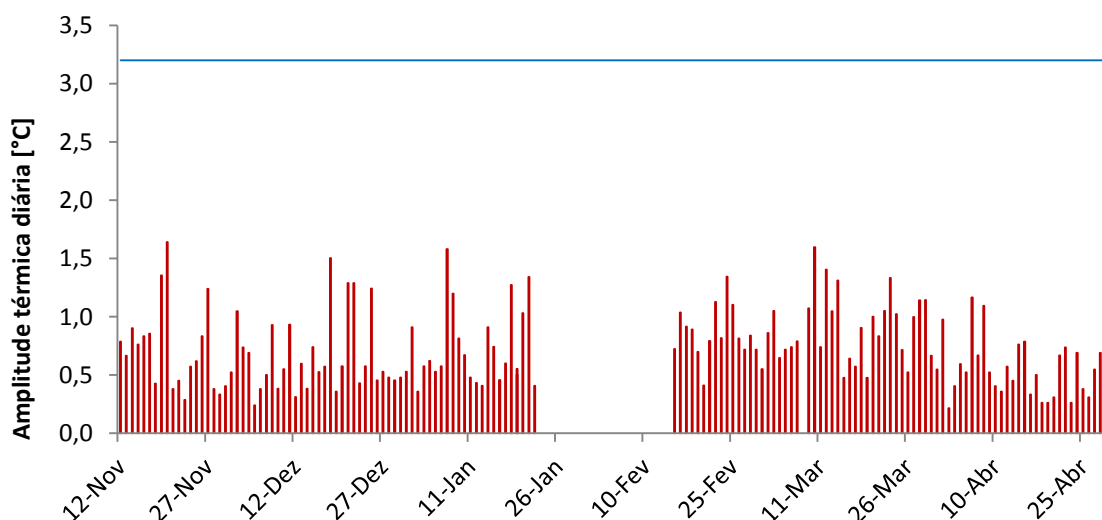


Figura 6.21 - Amplitude para os ciclos diários de temperatura no interior da Igreja no período compreendido entre 12 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012

Na figura 6.22, observam-se os ciclos de humidade relativa e respectivo limite aconselhável, confirmando-se as pequenas amplitudes para o interior da Igreja, como se tinha referido anteriormente, mas verificando-se variações acima das ocorridas para as temperaturas. Visualiza-se a presença de uma amplitude máxima de 10%, com a presença de 9 dias em que a amplitude de humidade relativa ultrapassa o valor limite recomendado de 7%, o que contudo não deverá ser significativo.

Do ponto de vista da conservação dos materiais e artefactos, conclui-se que o edifício possibilita condições favoráveis, visto apresentar ciclos reduzidos tanto para a temperatura como para a humidade relativa, apesar de para esta ultima ocorrerem alguns dias em que o limite é ultrapassado.

O facto de as amplitudes serem reduzidas pode-se justificar pela elevada inércia térmica do edifício, fraca ventilação e pela ausência de aparelhos mecânicos de controlo de temperatura e humidade relativa.

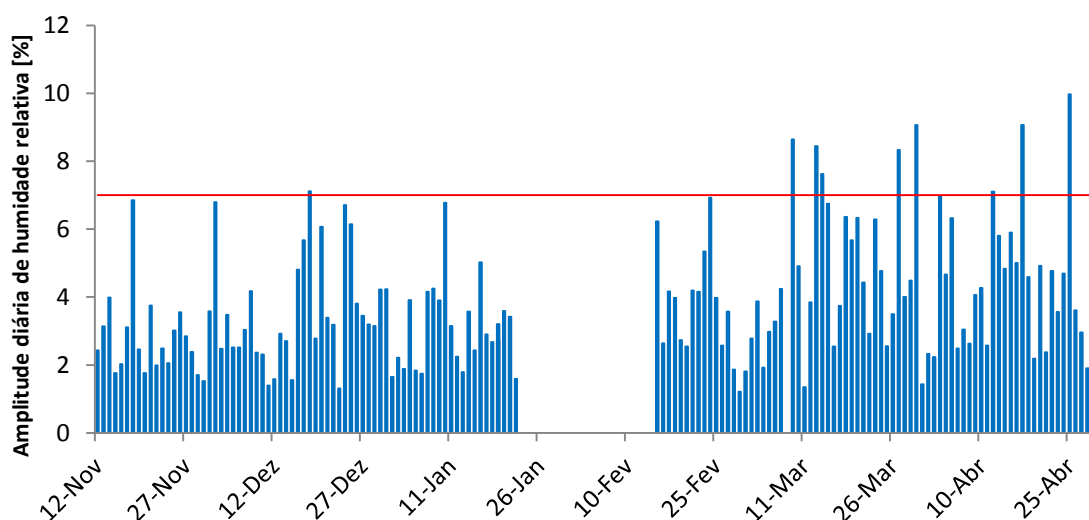


Figura 6.22 - Amplitude para os ciclos diários de humidade relativa no interior da Igreja no período compreendido entre 12 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012

6.4. Medições manuais

Com o intuito de obter um conhecimento mais profundo acerca do microclima presente no interior da nave principal da Igreja, efectuaram-se duas baterias de medições para a temperatura e humidade relativa, perfazendo um total de 136 pontos, como se encontra explicado na secção 5.4.2.

Para o desenrolar deste processo utilizou-se um único aparelho, deslocando-se de ponto para ponto, de modo a minorar os erros e aumentar a fiabilidade das medições.

Efectuaram-se duas baterias de medições, uma no final do Inverno, a 8 de Março de 2012 e a segunda durante a Primavera, a 5 de Maio de 2012.

No total dos 136 pontos, obtiveram-se 4 planos horizontais, 5 planos verticais longitudinais e 7 planos verticais transversais, tendo-se optado pela apresentação de um plano horizontal a uma altura de 2,85 m e um plano vertical longitudinal a passar pelo centro da Igreja.

6.4.1. Inverno - 8 de Março de 2012

Na figura 6.23 apresenta-se o mapeamento horizontal de temperaturas a uma altura de 2,85 m, através de um mapa de isolinhas com coloração, onde se pode observar que as zonas mais quentes da nave principal se encontram junto à porta que dá acesso à sacristia e nos primeiros quatro metros a oeste, junto à porta principal de entrada. Verifica-se ainda que a zona mais a norte apresenta temperaturas inferiores à zona oposta e uma tendência de perda de temperatura conforme se avança em direcção ao altar, verificando-se que a zona central, longe das superfícies, se apresenta

mais estável que a sua envolvente. Contudo, é de ressaltar que as temperaturas ao longo de toda a sala apresentam variações muito pequenas.

O facto da zona junto à entrada para a sacristia apresentar a temperatura mais elevada, contrariamente ao que seria de esperar, prende-se com o facto de nesse dia se ter desenvolvido uma inventariação da arte sacra presente na Igreja, com as actividades humanas a se desenrolarem especialmente nesta zona. Para os restantes casos, ocorreu um comportamento de acordo com o verificado nas secções 6.1 e 6.2.

Na figura 6.24 apresenta-se o mapeamento horizontal de humidades relativas a uma altura de 2,85 m, através de um mapa de isolinhas com coloração, no qual se pode observar uma grande constância de valores em toda a sua área. Nota-se que os menores valores encontram-se junto à entrada para a sacristia, onde as temperaturas são mais elevadas, verificando-se que não há acumulação de vapor de água apesar da presença humana, o que se pode justificar pelo facto de as janelas se encontrarem abertas.

Verificam-se humidades relativas mais elevadas junto às superfícies, principalmente nas zonas junto das paredes norte e sul, próximas aos altares laterais centrais. Os valores mais elevados encontram-se a oeste, junto à entrada principal, com os valores mais reduzidos a encontrarem-se junto do altar, o que se pode justificar pelas janelas se encontrarem abertas nesta zona e pela constante abertura de portas dada a presença humana, contribuindo para uma maior ventilação neste zona.

Nas figuras 6.25 e 6.26, apresentam-se as representações tridimensionais dos dados fornecidos nas figuras 6.23 e 6.24, para a temperatura e humidade relativa, respectivamente, a uma altura de 2,85 m.

É importante ressaltar que as variações são muito pequenas, tendo-se apresentado uma escala muito fina para possibilitar a sua observação. Contudo estas variações aparecem de acordo com o esperado e são coerentes com os resultados obtidos nas medições automáticas.

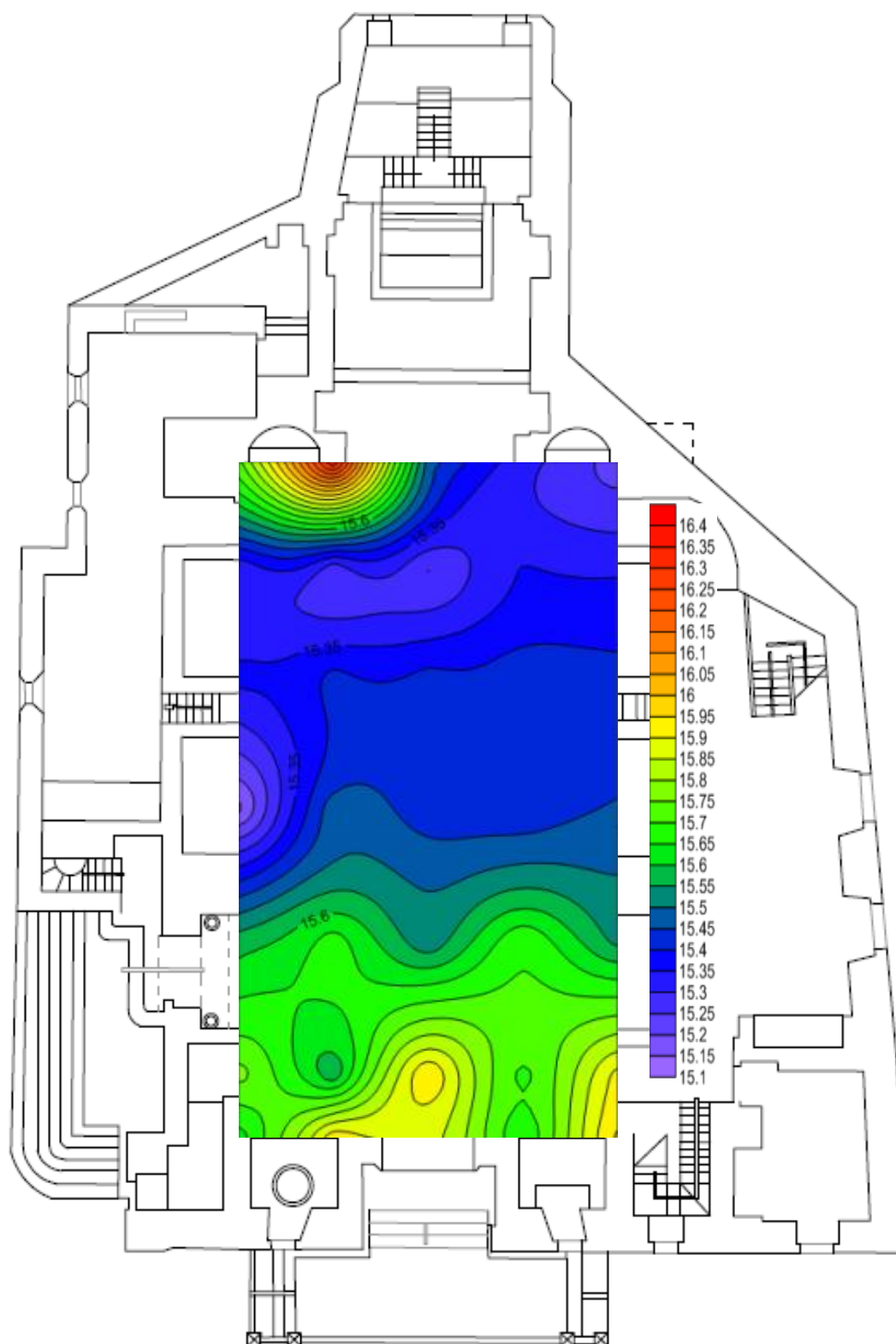


Figura 6.23 - Mapeamento horizontal das temperaturas a uma altura de 2,85 m no dia 8 de Março de 2012

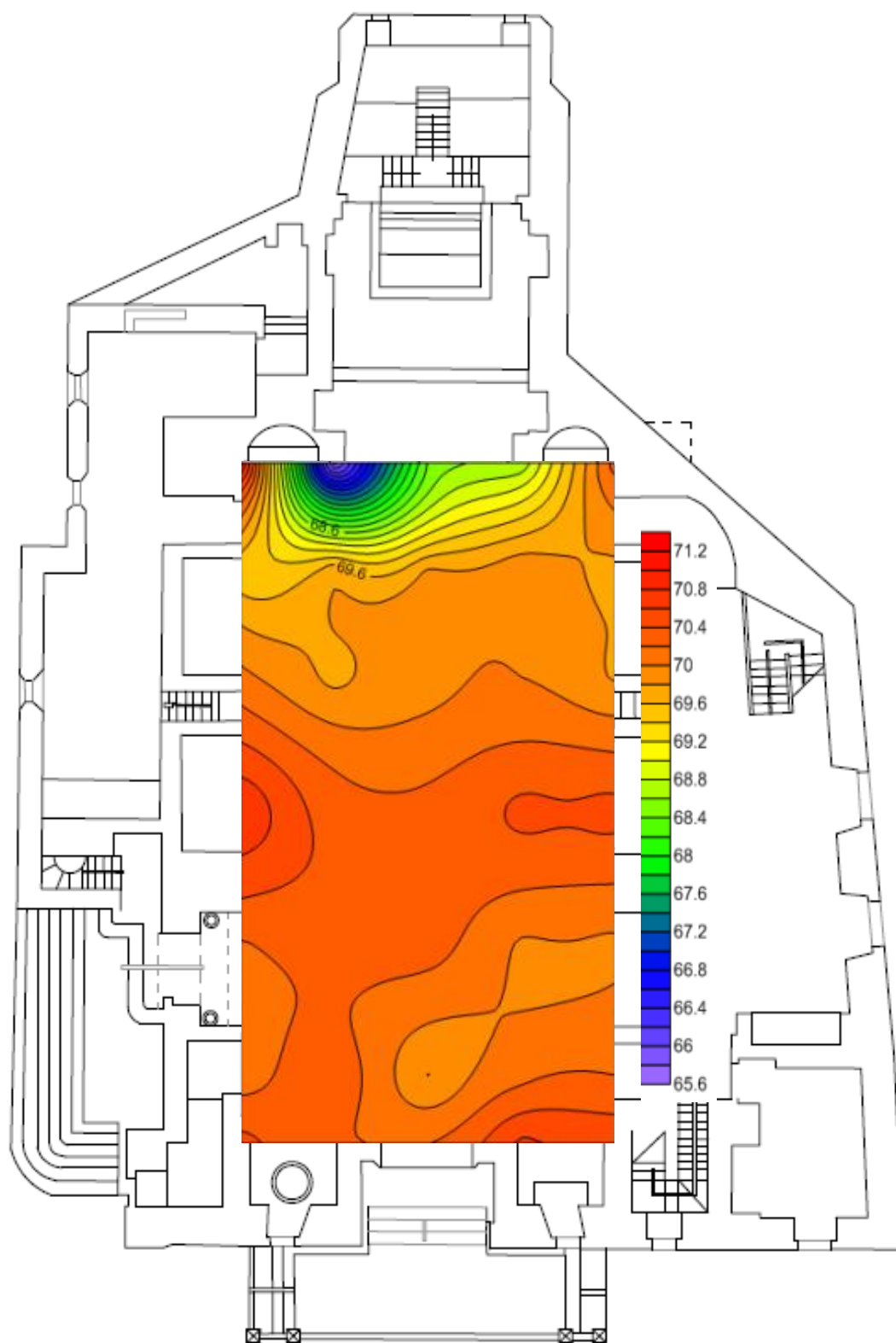


Figura 6.24 - Mapeamento horizontal das humidades relativas a uma altura de 2,85 m no dia 8 de Março de 2012

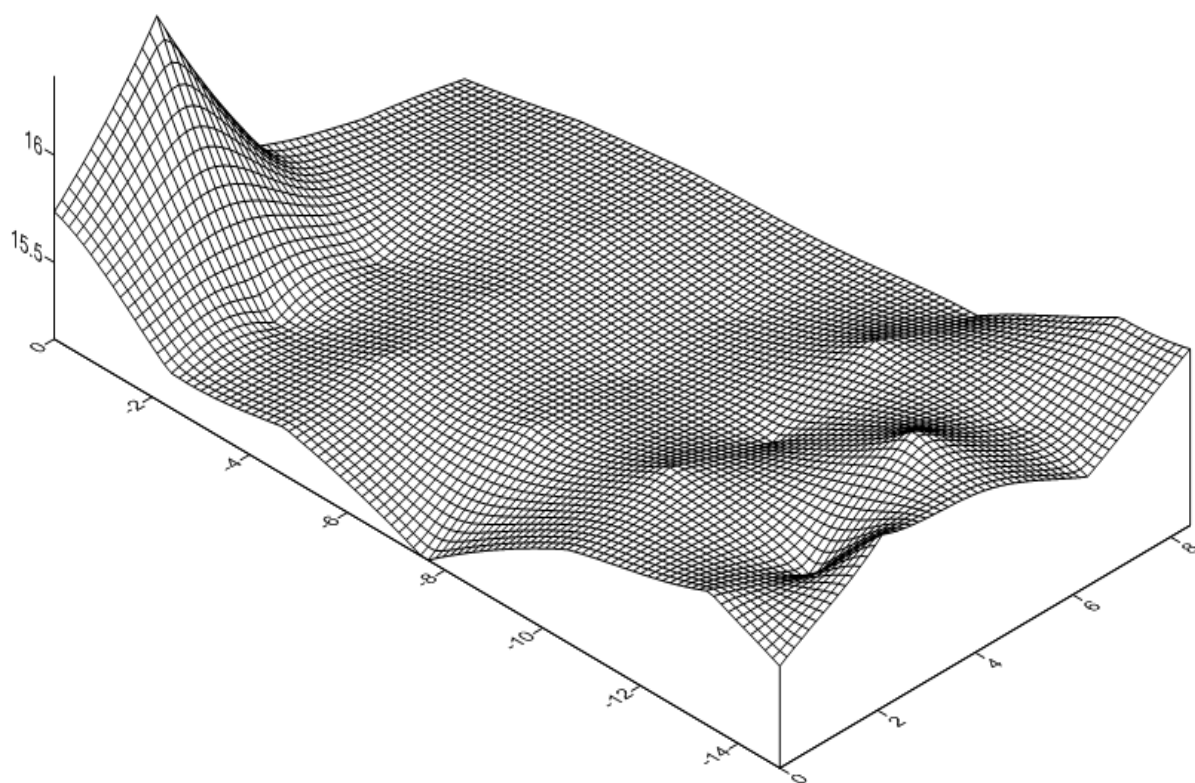


Figura 6.25 - Representação tridimensional da temperatura num plano horizontal a uma altura de 2,85 m para o dia 8 de Março de 2012

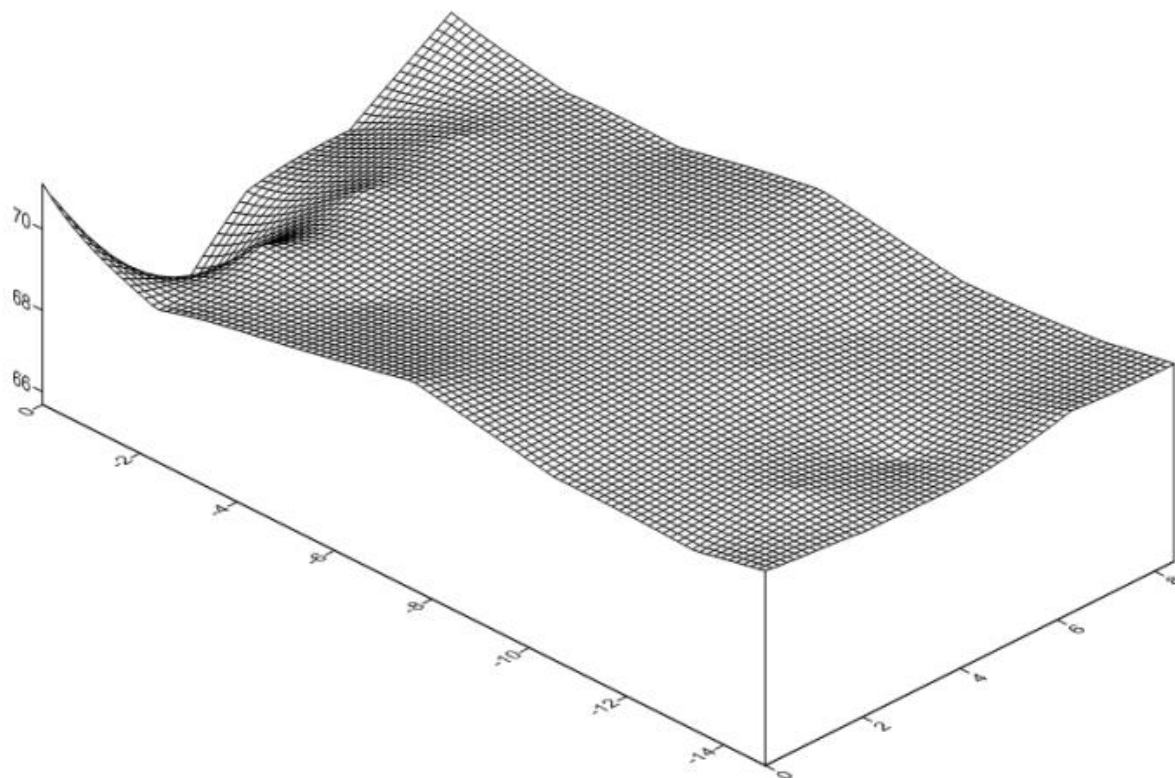


Figura 6.26 - Representação tridimensional da humidade relativa num plano horizontal a uma altura de 2.85 metros para o dia 8 de Março de 2012

Na figura 6.27 apresenta-se o mapeamento vertical de temperaturas num plano vertical a passar pelo centro da Igreja, através de um mapa de isolinhas com coloração. Apesar de o dia 8 de Março de 2012, como se referiu para a figura 6.5, se apresentar como a data a partir da qual se inicia a estratificação do ar por temperaturas, tal não se consegue observar na figura 6.27.

Os pontos apresentam temperaturas muito constantes em altura, notando-se que as temperaturas máximas se encontram junto à porta principal e diminuem com a aproximação da zona central, representada na figura em tons de azul, onde se verificam os valores mais baixos e constantes, voltando a aumentar ligeiramente com a aproximação do altar. Junto ao altar é a única zona onde se pode verificar a estratificação do ar, com as temperaturas mais baixas junto ao pavimento e as mais elevadas junto da cobertura.

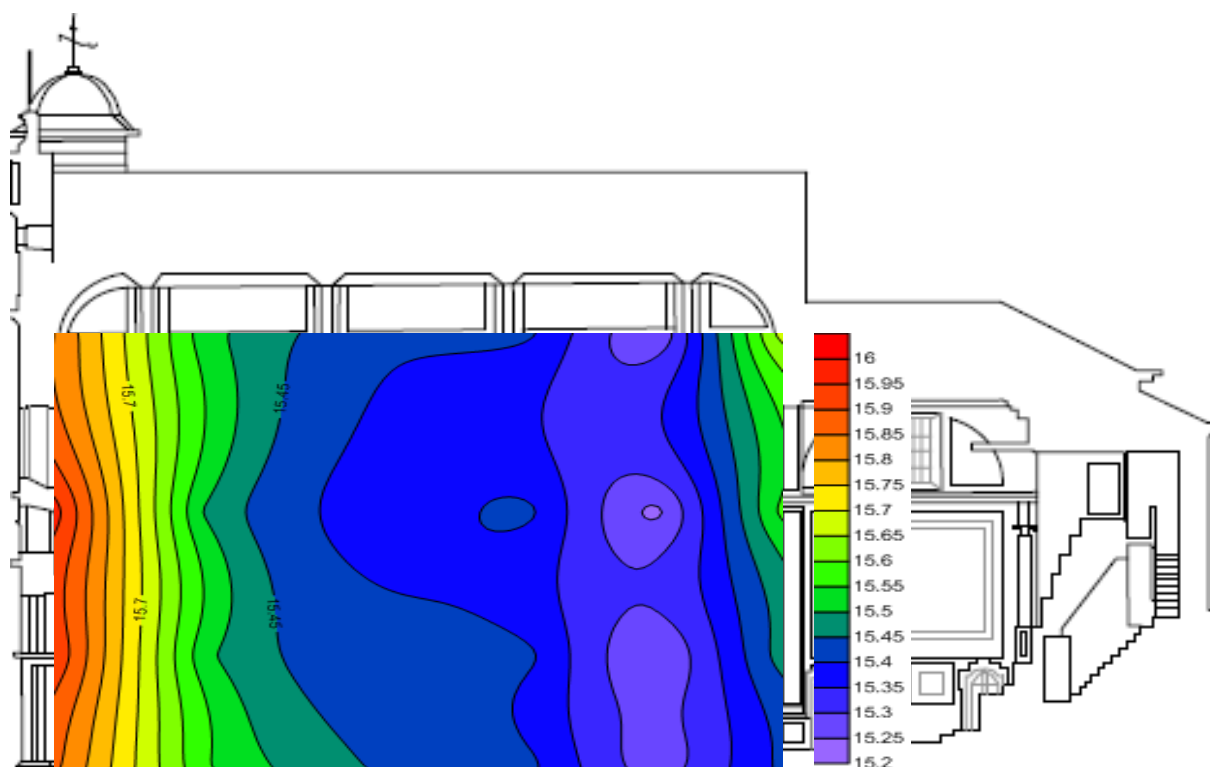


Figura 6.27 - Mapeamento vertical das temperaturas num plano a passar pelo centro da Igreja no dia 8 de Março de 2012

Na figura 6.28 apresenta-se o mapeamento vertical de humidades relativas num plano vertical a passar pelo centro da Igreja, através de um mapa de isolinhas com coloração.

Verifica-se que as humidades relativas mais elevadas se encontram junto à entrada principal a oeste, diminuindo gradualmente até ao altar. Não seria de esperar que se encontrassem as humidades relativas mais elevadas junto à entrada principal, pelo facto de ser também a zona onde se observam as temperaturas mais altas. Isto pode-se justificar com a deficiente ventilação do local.

Observa-se ainda a tendência de se encontrarem humidades relativas mais elevadas consoante a altura aumente, o que também não era esperado, pois apesar de não se verificar em todo o plano da figura 6.27, neste período já se observava a estratificação das várias camadas por temperaturas,

sendo de esperar que as humidades relativas diminuíssem com o aumento da altura. Este facto pode uma vez mais justificar-se pela menor ventilação verificada junto da cobertura.

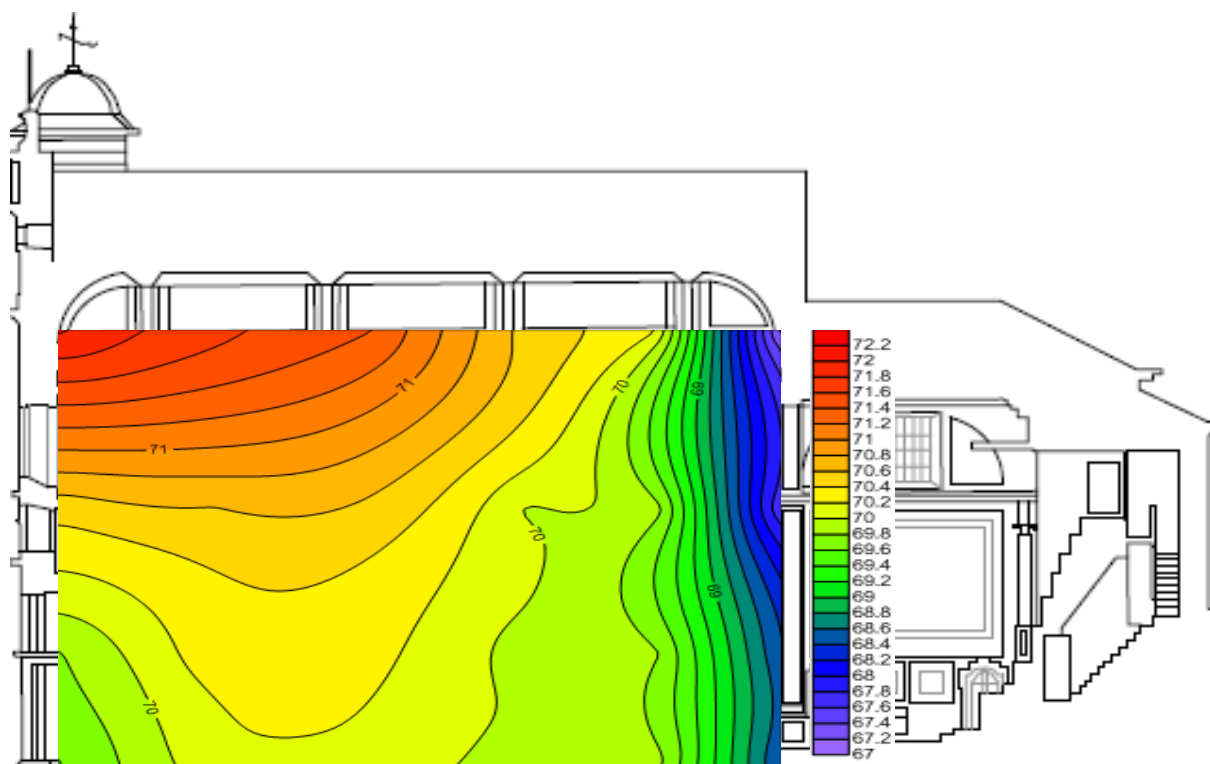


Figura 6.28 - Mapeamento vertical das humidades relativas num plano a passar pelo centro da Igreja no dia 8 de Março de 2012

6.4.2. Primavera - 3 de Maio de 2012

Na figura 6.29 apresenta-se o mapeamento horizontal de temperaturas a uma altura de 2,85 m, através de um mapa de isolinhas com coloração.

Verifica-se uma variação de temperaturas muito pequena ao longo de toda a sala, notando-se que as zonas mais frias encontram-se junto das superfícies e os valores mais elevados nas proximidades da porta principal, porta de acesso às torres e na porta que liga à rua a norte. Isto deve-se à inércia térmica das paredes, que ainda lhes proporciona uma influencia forte do período de Outono/Inverno precedentes, com as superfícies a apresentarem temperaturas mais baixas que o ar. Esta estabilidade de temperaturas justifica-se também com o facto de a Igreja se encontrar fechada e vazia na altura das leituras.

Pode-se ainda observar uma diminuição de temperatura na zona que dá acesso à casa mortuária, verificando-se o contrário para a porta de acesso ao coro e às torres, apesar de se apresentarem ambas na parede orientada a sul.

Na figura 6.30 apresenta-se o mapeamento horizontal de humidades relativas a uma altura de 2,85 m, através de um mapa de isolinhas.

Consegue-se verificar facilmente que todos os valores se encontram muito próximos, encontrando-se as humidades relativas mais elevadas na zona central, onde se verificaram as temperaturas mais baixas. Por outro lado, encontram-se os valores mais baixos junto das superfícies das paredes, visto estas apresentarem as temperaturas mais elevadas. Repara-se ainda numa redução mais acentuada do que para os restantes casos na zona que dá acesso à casa mortuária, aumentando na porta que dá acesso para a sacristia a norte e para o coro e torres a sudoeste, de acordo com as temperaturas verificadas. Nota-se também uma tendência da humidade relativa em diminuir desde a entrada principal, a oeste, até às proximidades do altar principal.

Nas figuras 6.31 e 6.32 apresentam-se as representações tridimensionais dos dados fornecidos nas figuras 6.29 e 6.30, para a temperatura e humidade relativa, respectivamente, a uma altura de 2,85 m. Apesar de nas figuras referidas se ter a percepção de diferenças bastante acentuadas, isso não se verifica, justificando-se com o facto de a escala utilizada ser muito apertada, por imposição do programa utilizado.

Na figura 6.33 apresenta-se o mapeamento das temperaturas num plano vertical a passar pelo centro da Igreja, através de um mapa de isolinhas com coloração.

Verifica-se a estratificação do ar por temperaturas, com os valores a aumentarem proporcionalmente à altura. Observa-se também que se verificam as temperaturas mais baixas nas proximidades do altar, e na zona central, em frente aos altares laterais, com a tendência para os valores diminuírem consoante se processa a aproximação do altar-mor.

Na figura 6.34 apresenta-se o mapeamento das humidades relativas num plano vertical a passar pelo centro da Igreja, através de um mapa de isolinhas com coloração.

Verifica-se que as humidades relativas mais elevadas registam-se na zona mais próxima do altar-mor, a confirmar a tendência verificada no caso das temperaturas. No entanto, nota-se que em perfil vertical, se encontram humidades relativas superiores para as alturas mais elevadas, contrariando assim a tendência verificada com as temperaturas na figura 6.33. Isto pode-se justificar pela existência de uma ventilação deficiente na zona superior da Igreja.

É importante ressaltar que as variações são muito pequenas, tendo-se apresentado uma escala muito fina para possibilitar a sua observação. Contudo estas variações aparecem de acordo com o esperado e são coerentes com os resultados obtidos nas medições automáticas.

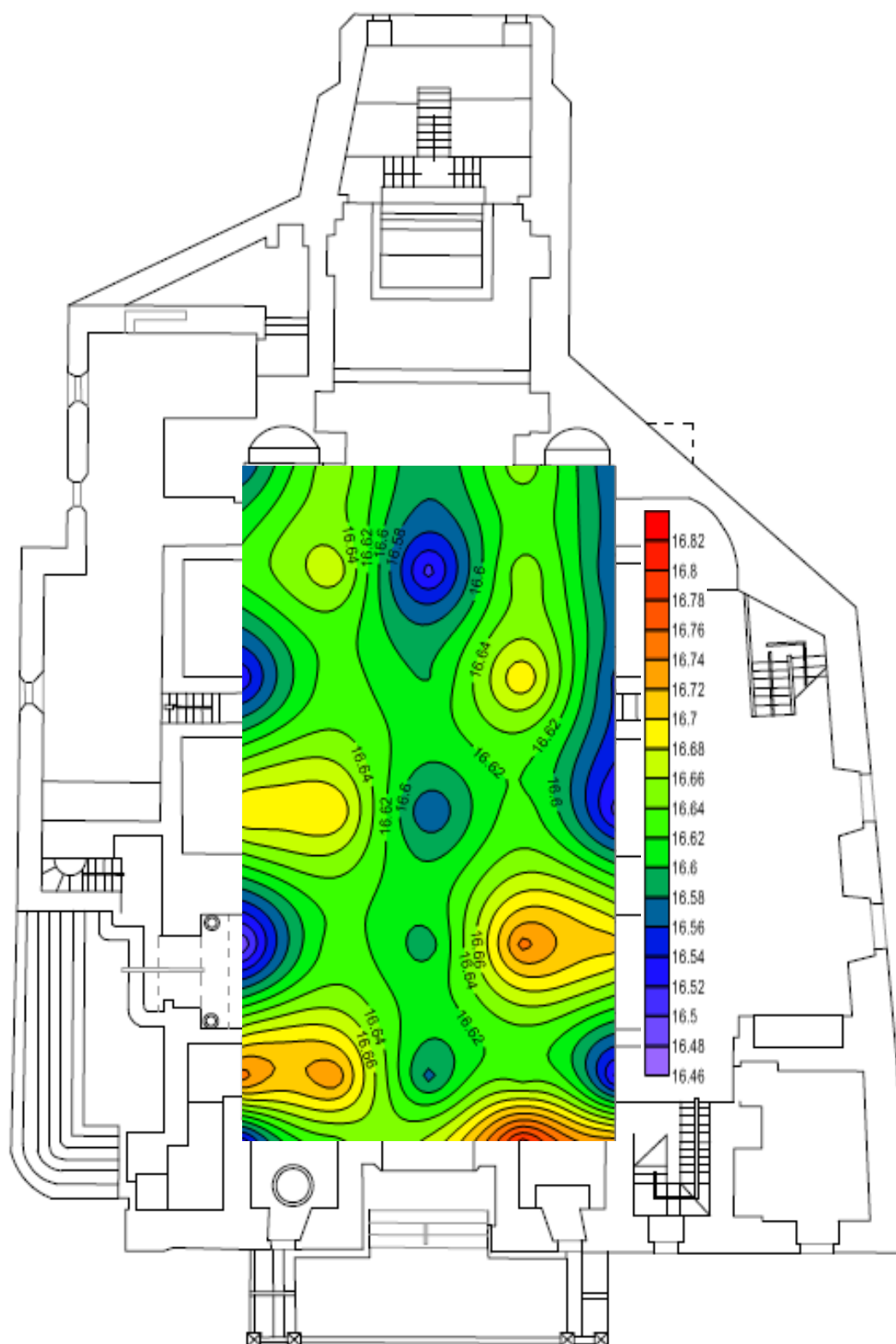


Figura 6.29 - Mapeamento horizontal das temperaturas a uma altura de 2,85 m no dia 3 de Maio de 2012

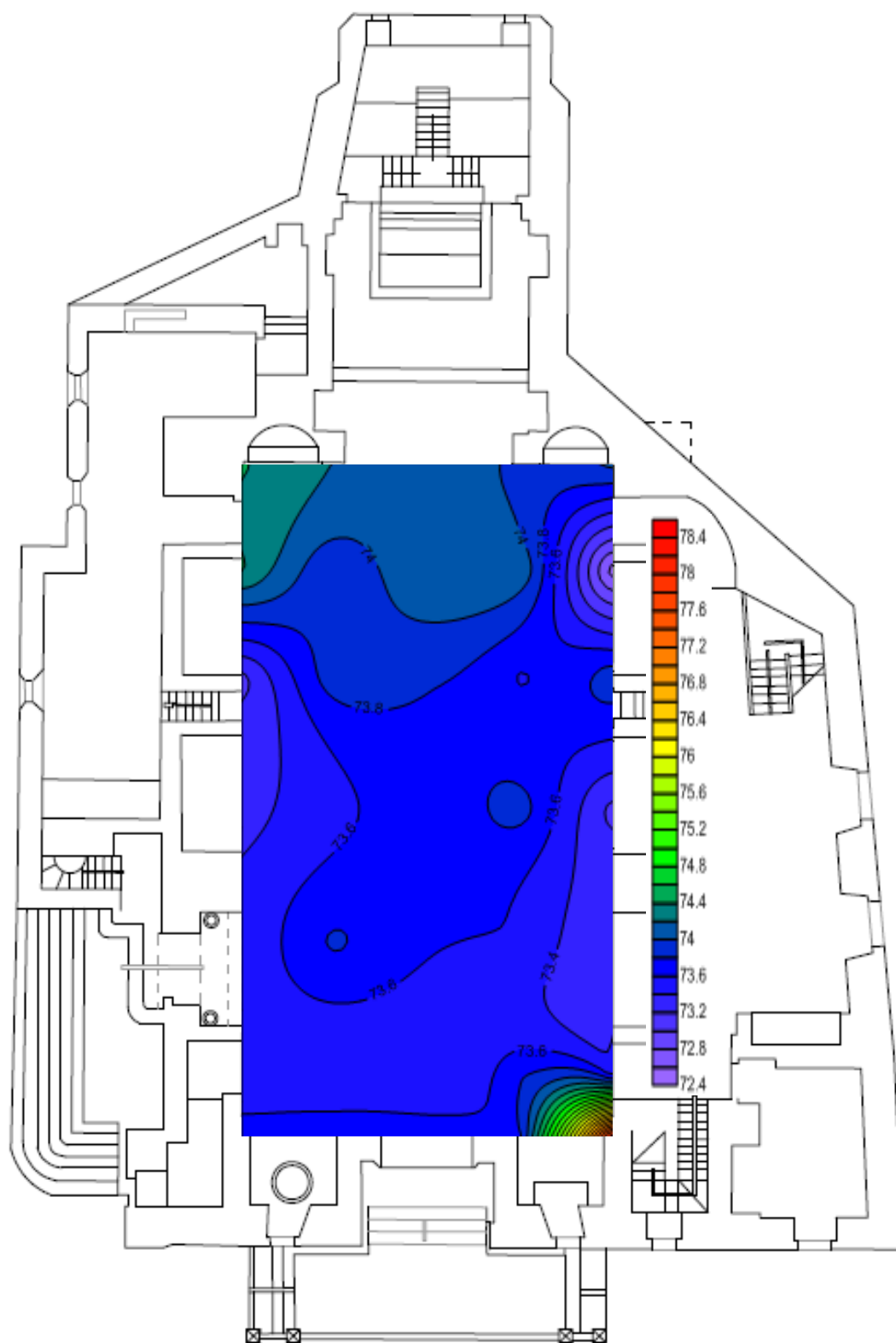


Figura 6.30 - Mapeamento horizontal das humidades relativas a uma altura de 2,85 m no dia 3 de Maio de 2012

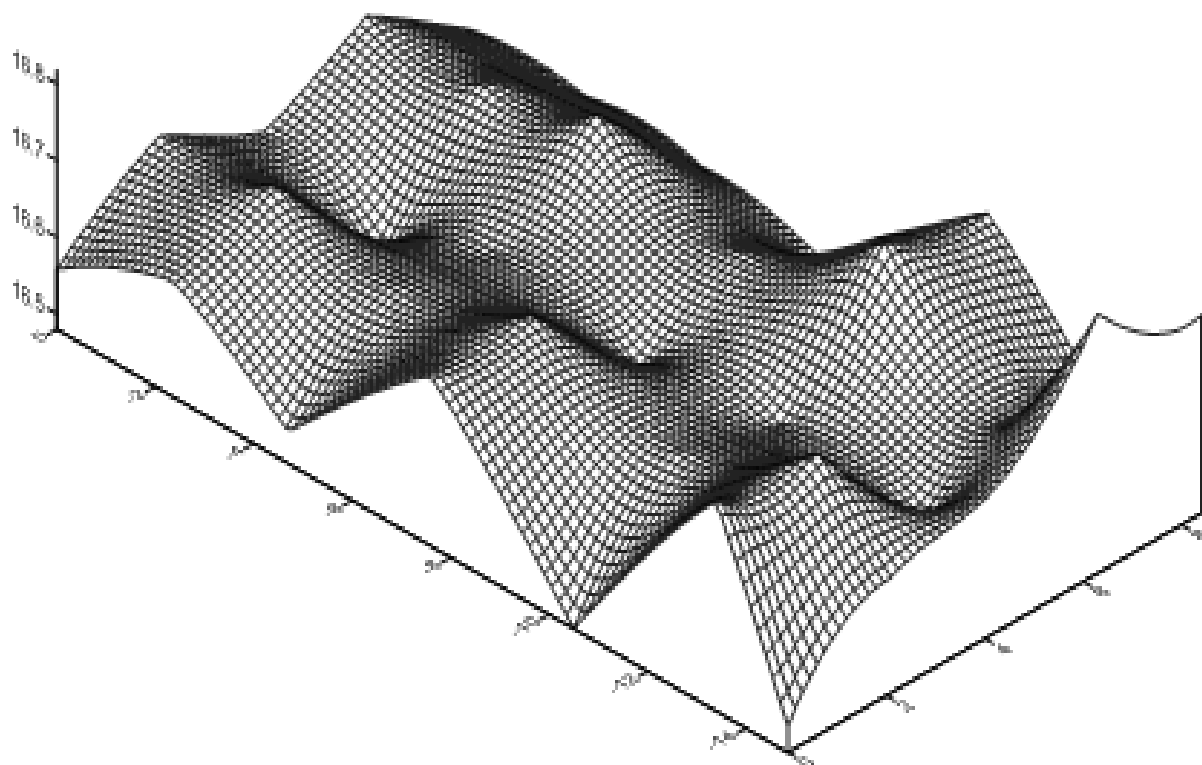


Figura 6.31 - Representação tridimensional da temperatura num plano horizontal a uma altura de 2,85 m para o dia 3 de Maio de 2012

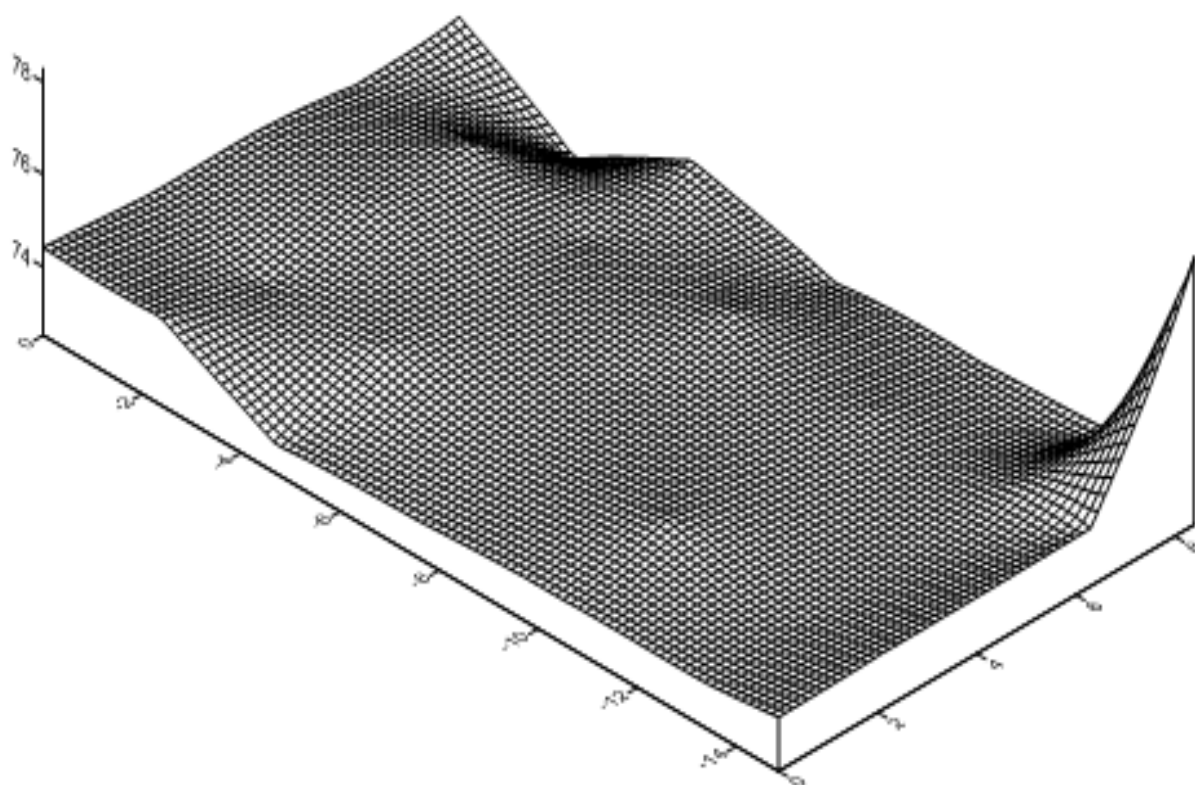


Figura 6.32 - Representação tridimensional da humidade relativa num plano horizontal a uma altura de 2,85 m para o dia 3 de Maio de 2012

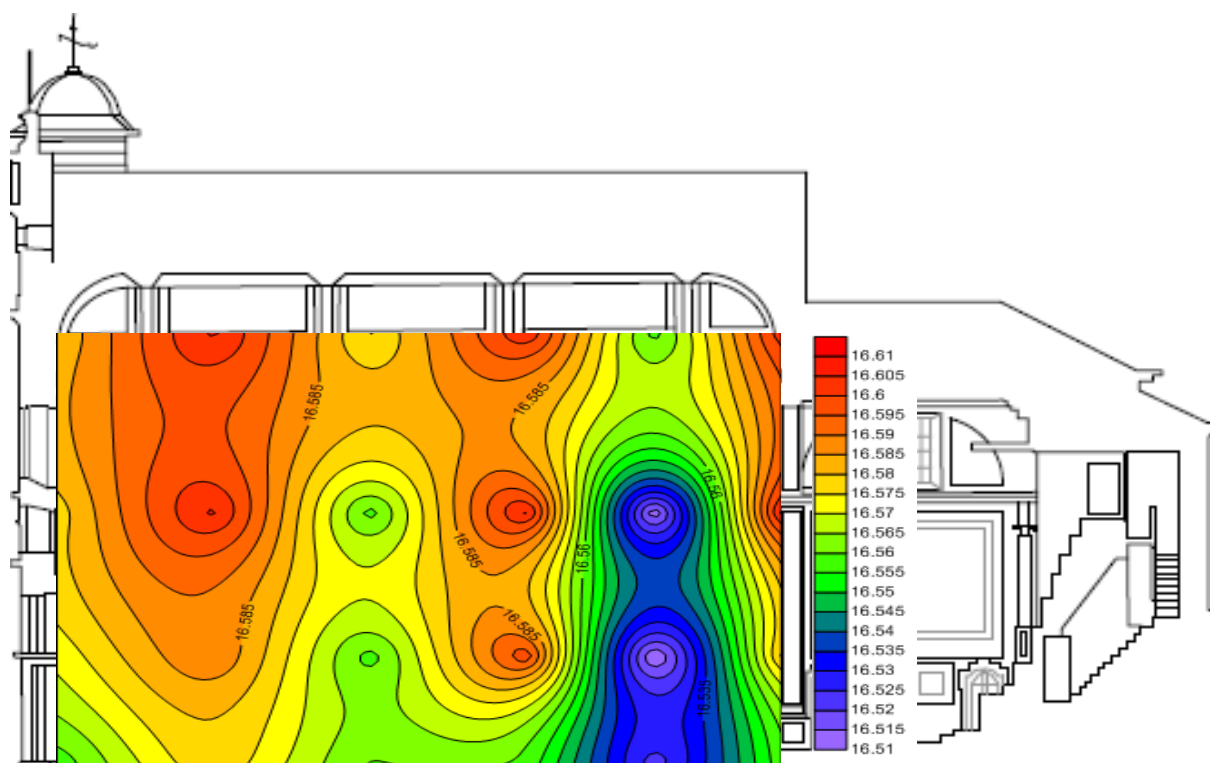


Figura 6.33 - Mapeamento vertical das temperaturas num plano a passar pelo centro da Igreja no dia 3 de Maio de 2012

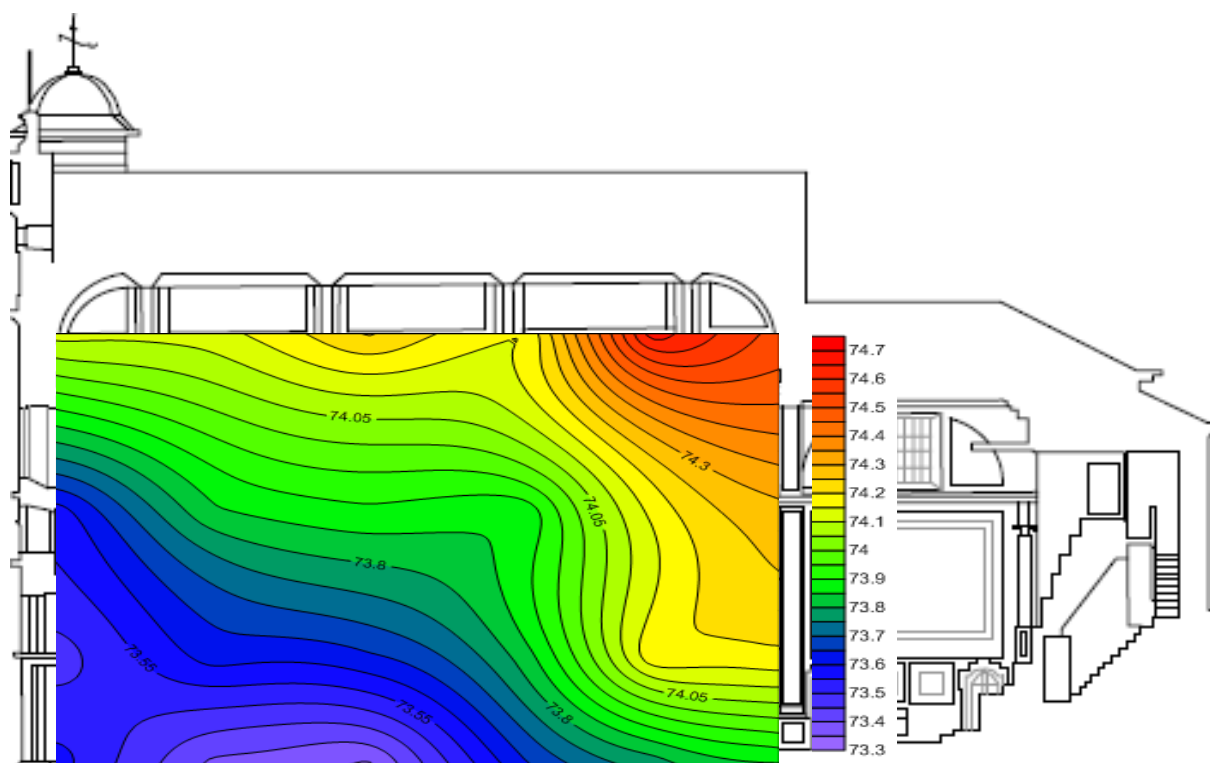


Figura 6.34 - Mapeamento vertical das humidades relativas num plano a passar pelo centro da Igreja no dia 3 de Maio de 2012

7. Conclusões

7.1. Principais conclusões

Com a realização deste estudo, que decorreu no período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 30 de Abril de 2012, foi possível monitorizar o clima interior e circundante da Igreja de São Cristóvão, em Lisboa.

Efectuaram-se leituras de temperatura e humidade relativa do ar e temperatura de uma superfície situada na zona norte da nave principal no interior do edifício, perfazendo um total de vinte e quatro pontos controlados, aos quais se acrescentou ainda um sensor colocado na torre norte para verificação das condições exteriores e um outro no desvão da cobertura. Para além dos pontos de controlo e medição permanentes referidos, efectuaram-se também duas baterias de leituras manuais, assim como leituras manuais esporádicas no interior da nave principal, com o objectivo de obter uma melhor caracterização do clima interior neste local.

Com a análise dos resultados concluiu-se que a Igreja apresenta um microclima muito estável, sujeito a pequenos ciclos diários de temperatura e humidade relativa, não acompanhando as maiores diferenças verificadas no exterior, notando-se ainda um elevado atraso das condições sazonais. Estes dois factos justificam-se pela elevada inércia térmica e deficiente ventilação do edifício.

No seu interior, verificou-se que a nave principal apresenta um clima mais estável, em comparação com a sacristia e a casa mortuária, que apresentam valores de temperatura inferiores e superiores, respectivamente, para todo o ano. Sucede o inverso com a humidade relativa, o que pode ser justificado pela maior ventilação encontrada nas salas circundantes e com o facto de estas estarem em contacto com o exterior. Notou-se ainda que o desvão apresenta variações mais ténues que o exterior, observando-se a presença normal de humidades relativas elevadas, dada a sua muito fraca ventilação. No altar verificaram-se valores de temperatura superiores aos da nave principal para o período de Outono/Inverno e inferiores para o período de Primavera/Verão, dada a sua maior inércia térmica, por se encontrar enterrado, apresentando também valores de humidade relativa tendencialmente mais elevados, visto ser o local com ventilação mais deficiente e apresentar, por vezes, a presença de velas.

A análise dos valores fornecidos pela coluna vertical de sensores permitiu concluir que, durante o período compreendido entre 11 de Novembro de 2011 e 16 de Fevereiro de 2012, não existe uma estratificação do ar por temperaturas, encontrando-se os valores mais altos junto do pavimento e baixando progressivamente até à cobertura, o que se reflecte na formação das condições necessárias para a geração de correntes convectivas, com o ar a aquecer junto do pavimento, subir até às proximidades da cobertura, onde vai arrefecer, ganhar densidade e descer. De 16 de Fevereiro a 7 de Março de 2012 começou-se a verificar a inversão da tendência, tendo esta sido alcançada no dia 8 de Março. A partir deste dia o ar estabilizou, verificando-se as temperaturas mais baixas junto do pavimento e aumentando progressivamente até à cobertura. Deste modo, a partir do dia referido começou-se a verificar o processo inverso para a humidade relativa.

Da análise efectuada na nave principal verifica-se a tendência para se encontrarem temperaturas mais elevadas na zona mais a sul, intermédias no centro e mais baixas a norte, o que se justifica com a maior exposição solar ocorrida a sul. Na distribuição longitudinal, verifica-se a tendência para as temperaturas serem mais elevadas junto ao altar, até 16 de Fevereiro, invertendo-se depois a tendência, passando-se a encontrar as maiores temperaturas para a zona do coro, junto da entrada principal, o que se justifica com o aumento das temperaturas exteriores.

Para a comparação das condições verificadas numa superfície e para o ar à mesma altura, verifica-se que as temperaturas superficiais apresentam valores superiores até 30 de Dezembro de 2011, devido à elevada inércia térmica que possibilita um perda gradual de calor e um desfasamento elevado para os ciclos sazonais. A partir desta data verificou-se a inversão dos valores, passando a superfície a apresentar temperaturas inferiores. Apesar disto a diminuição da temperatura foi reduzida e insuficiente para conduzir a uma elevação da humidade relativa que pudesse conduzir ao perigo de condensações superficiais, o que se justifica com o facto de se terem verificado sempre humidades relativas interiores inferiores a 80 %.

Concluiu-se ainda que os picos de temperatura e humidade relativa interiores ocorrem, na grande maioria dos casos, no período de abertura da Igreja, sendo sobretudo devidos à presença humana, estando o ambiente interior pouco dependente das variações diárias exteriores.

7.2. Desenvolvimentos futuros

Com o intuito de fortalecer o presente estudo e confirmar as tendências verificadas propõem-se os seguintes desenvolvimentos futuros:

- Continuação do estudo por um período de tempo mais alargado, visto se ter presenciado um Inverno muito seco e que não vai de encontro com as condições encontradas nos últimos três anos, nem com a normal climatológica de 1971-2000;
- Monitorização das condições superficiais numa parede exterior a norte e a sul, de modo a conseguir comprovar o risco de condensações superficiais;
- Utilização de sensores específicos para a medições de humidades relativas superficiais, evitando-se a correlação através das temperaturas verificadas;
- Utilização de câmara de termografia para ter um maior conhecimento, principalmente, das condições superficiais verificadas em toda a Igreja;
- Realização de medições esporádicas da movimentação do ar, para confirmar a presença de correntes convectivas e verificar a localização das zonas com maiores taxas de ventilação;
- Utilização de sensores de monitorização para avaliar a qualidade do ar interior e confirmar a influência da presença humana para o microclima interior;
- Utilização de um sensor de resposta rápida para as medições manuais destinadas ao mapeamento da nave principal e realização de uma bateria de testes por mês, de modo a permitir a sua comparação e verificar as evoluções ocorridas.

Bibliografia

- [1] *Atlas Climático Ibérico - Temperatura do ar e precipitação (1971-2000)*. Agência Estatal de Meteorología; Ministério de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino; Instituto de Meteorologia de Portugal, 2011.
- [2] BECHERINI, F., A. BERNARDI, e E. FRASSOLDATI. - *Microclimate inside a semi-confined environment: Valuation of suitability for the conservation of the heritage materials*. Journal of Cultural Heritage, vol. 11, Out-Dez 2010: 471-476.
- [3] BRATASZ, L., D. CAMUFFO, e R. KOZLOWSKY. . *Target microclimate for preservation derived from past indoor conditions*. Museum Microclimates, T. Padfield & K. Borchersen (eds.) National Museum of Denmark, 2007: 129-134.
- [4] CAMUFFO, D et al. - *An advanced church heating system favourable to artworks: A contribution to European standardisation*. Journal of Cultural Heritage, vol. 11, Abr-Jun 2010: 205-219.
- [5] CAMUFFO, D. et al. - *Indoor air quality at the Correr Museum, Venice, Italy*. Science of the Total Environment, vol. 236, Set 1999: 135-152.
- [6] CAMUFFO, D. et al. - *Environmental monitoring in four European museums*. Atmospheric Environment, vol. 35, 2001: S127-S140.
- [7] CAMUFFO, D. - *Microclimate for Cultural Heritage*. Amsterdam: Elsevier, 1998.
- [8] CAMUFFO, D., A BERNARDI, G. STURANO, and A. VALENTINO. - *The microclimate inside the Pollaiuolo and Botticelli rooms in the Uffizi Gallery, Florence*. Journal of Cultural Heritage, vol. 3, Abr-Jun 2002: 155-161.
- [9] CAMUFFO, D., e A. BERNARDI. - *Analisi microclimatica al Cenacolo Vinciano - The microclimate of Leonardo's "Last Supper"*. Padova: Associazione Geofisica Italiana, 1991.
- [10] CAMUFFO, D., E. PAGAN, A. BERNARDI, e F. BECHERINI. - *The impact of heating, lighting and people in re-using historical buildings: a case study*. Journal of Cultural Heritage, vol. 5, Out-Dez 2004: 409-416.
- [11] CATALDO, R. et al. - *Integrated methods for analysis of deterioration of cultural heritage: the Crypt of "Cattedrale di Otranto"*. Journal of Cultural Heritage, vol. 6, Jan-Mar 2005: 29-38.
- [12] CATARINO, I.N. - *Análise das condições higrotérmicas na Biblioteca da Universidade de Coimbra*. Dissertação de Mestrado. Coimbra: FCT-UC, 2010.

- [13] CLARA, E. - *Igreja de São Cristóvão - Projecto de Financiamento*. Lisboa, 2012.
- [14] CORGNATI, S.P., e M. FILIPI. - *Assessment of thermo-hygrometric quality in museums: Method and in-field application to the "Duccio di Buoninsegna" exhibition at Santa Maria della Scala (Siena, Italy)*. Journal of Cultural Heritage, vol. 11, Jul-Set 2010: 345-349.
- [15] CORGNATI, S.P., V. FABI, e M. FILIPI. - *A methodology for microclimatic quality evaluation in museums: Application to a temporary exhibit*. Building and Environment, vol. 44, Jun 2009: 1253-1260.
- [16] DA COSTA, A.C.M. - *Águas pluviais em meio urbano - Contribuição de Lisboa para o seu uso sustentável*. Dissertação de Mestrado. Lisboa: FCT-UNL, 2010.
- [17] DA SILVA, P. - *Análise do comportamento térmico de construções não convencionais através de simulação em VisualDOE*. Dissertação de Mestrado. Minho: Universidade do Minho, 2006.
- [18] DA SILVA, T.A.L. - *Estudo Experimental do Comportamento Higrotérmico de Igrejas*. Porto, Portugal: Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [19] DE AZEVEDO, S.C. - *Influência do teor de água no comportamento de materiais de construção*. Dissertação de Mestrado. Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2011.
- [20] Espaço e Tempo - Revelar Lisboa. s.d. http://revelarlx.cm-lisboa.pt/gca/index.php?id=335&cat_visita=083 (acedido em Fevereiro de 2012).
- [21] FERREIRA, C.S.F.M. - *Importância da inércia higroscópica em Museus*. Dissertação de Mestrado. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [22] FREITAS, V. - *Transferência de humidade em paredes de edifícios - Análise do fenómeno de interface*. Tese de Doutoramento. Porto: FEUP, 1992.
- [23] FREITAS, V., e P. PINTO. - *Humidade na construção - Humidade de condensação*. Porto: FEUP, 2003.
- [24] GARCIA-DIEGO, F.-J., e M. ZARZO. - *Microclimate monitoring by multivariate statistical control: The renaissance frescoes of the Cathedral of Valencia (Spain)*. Journal of Cultural Heritage, vol. 11, Jul-Set 2010: 339-344.
- [25] GYSELS, K. et al. - *Indoor environment and conservation in the Royal Museum of Fine Arts, Antwerp, Belgium*. Journal of Cultural Heritage, vol. 5, Abr-Jun 2004: 221-230.
- [26] HENRIQUES, F.M.A. - *Comportamento higrotérmico de edifícios*. Lisboa: FCT-UNL, 2011.

- [27] HENRIQUES, F.M.A. - *Humidade em paredes*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1994.
- [28] *HOB0 U12 Temp/RH/ 2 External Data Logger (part # U12-13)*. Onset Computer Corporation, 2009.
- [29] Instituto de Meteorologia, I.P. *Boletim climatológico anual - Ano 2010*. Lisboa: Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior - Instituto de Meteorologia, I.P., 2011.
- [30] Instituto de Meteorologia, I.P. *Boletim climatológico anual - Ano 2011 - Versão preliminar*. Lisboa: Ministério da Educação e da Ciência - Instituto de Meteorologia, I.P., 2012.
- [31] Instituto de Meteorologia, I.P. *Boletim climatológico mensal - Novembro 2009*. Lisboa: Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior - Instituto de Meteorologia, I.P., 2009.
- [32] Instituto de Meteorologia, I.P. *Boletim climatológico mensal - Dezembro 2009*. Lisboa: Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior - Instituto de Meteorologia, I.P., 2010.
- [33] Instituto de Meteorologia, I.P. *Boletim climatológico mensal - Janeiro 2010*. Lisboa: Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior - Instituto de Meteorologia, I.P., 2010.
- [34] Instituto de Meteorologia, I.P. *Boletim climatológico mensal - Fevereiro 2010*. Lisboa: Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior - Instituto de Meteorologia, I.P., 2010.
- [35] Instituto de Meteorologia, I.P. *Boletim climatológico mensal - Março 2010*. Lisboa: Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior - Instituto de Meteorologia, I.P., 2010.
- [36] Instituto de Meteorologia, I.P. *Boletim climatológico mensal - Abril 2010*. Lisboa: Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior - Instituto de Meteorologia, I.P., 2010.
- [37] Instituto de Meteorologia, I.P. *Boletim climatológico mensal - Novembro 2010*. Lisboa: Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior - Instituto de Meteorologia, I.P., 2010.
- [38] Instituto de Meteorologia, I.P. *Boletim climatológico mensal - Dezembro 2010*. Lisboa: Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior - Instituto de Meteorologia, I.P., 2011.
- [39] Instituto de Meteorologia, I.P. *Boletim climatológico mensal - Janeiro 2011*. Lisboa: Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior - Instituto de Meteorologia, I.P., 2011.
- [40] Instituto de Meteorologia, I.P. *Boletim climatológico mensal - Fevereiro 2011*. Lisboa: Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior - Instituto de Meteorologia, I.P., 2011.
- [41] Instituto de Meteorologia, I.P. *Boletim climatológico mensal - Março 2011*. Lisboa: Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior - Instituto de Meteorologia, I.P., 2011.

- [42] Instituto de Meteorologia, I.P. *Boletim climatológico mensal - Abril 2011*. Lisboa: Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior - Instituto de Meteorologia, I.P., 2011.
- [43] Instituto de Meteorologia, I.P. *Boletim climatológico mensal - Novembro 2011*. Lisboa: Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior - Instituto de Meteorologia, I.P., 2011.
- [44] Instituto de Meteorologia, I.P. *Boletim climatológico mensal - Dezembro 2011*. Lisboa: Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior - Instituto de Meteorologia, I.P., 2012.
- [45] Instituto de Meteorologia, I.P. *Boletim climatológico mensal - Janeiro 2012*. Lisboa: Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior - Instituto de Meteorologia, I.P., 2012.
- [46] Instituto de Meteorologia, I.P. *Boletim climatológico mensal - Fevereiro 2012*. Lisboa: Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior - Instituto de Meteorologia, I.P., 2012.
- [47] Instituto de Meteorologia, I.P. *Boletim climatológico mensal - Março 2012*. Lisboa: Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior - Instituto de Meteorologia, I.P., 2012.
- [48] Instituto de Meteorologia, I.P. *Boletim climatológico mensal - Abril 2012*. Lisboa: Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior - Instituto de Meteorologia, I.P., 2012.
- [49] Junta de Freguesia de S. Cristóvão e S. Lourenço. s.d. http://www.jf-scrivovao.pt/index.php?option=com_content&task=view&id=13&Itemid=30 (acedido em Fevereiro de 2012).
- [50] LANDIM, P.M.B., R.C. MONTEIRO, e A.C. CORSI. - *Introdução à confecção de mapas pelo software SURFER*. Rio Claro - Brasil: UNESP, 2002.
- [51] Lisboa - Guia da Cidade. s.d. <http://www.guiadacidade.pt/pt/poi-Igreja-de-sao-cristovao-17801> (acedido em Fevereiro de 2012).
- [52] Lisboa Verde - Câmara Municipal de Lisboa. s.d. <http://lisboaverde.cm-lisboa.pt/index.php?id=4369> (acedido em Fevereiro de 2012).
- [53] MELO, Â., E. MALDONADO, H. DE SOUSA, e P. LOURENÇO. - *Estudo articulado das anomalias do edifício da Igreja - Mosteiro de S. João de Tarouca*. 3º ENCORE - LNEC. Lisboa, 2003.
- [54] MONSALVE, M. - *Igreja Paroquial de S. Cristóvão*. Lisboa, 2011.
- [55] Monumentos - Igreja Matriz de São Cristóvão/ Igreja de São Cristóvão e São Lourenço. s.d. http://www.monumentos.pt/Site/APP_PagesUser/SIPA.aspx?id=6462 (acedido em Novembro de 2011).
- [56] PAVLOGEORGATOS, G. - *Environmental parameters in museums*. Building and Environment, vol. 38, Dez 2003: 1457-1462.

- [57] SAMEK, L. et al. - *The impact of electric overhead radiant heating on the indoor environment of historic churches*. Journal of Cultural Heritage, vol. 8, Set-Dez 2007: 361-369.
- [58] SANTOS, C.P.; MATIAS, L. - *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios*. Lisboa, LNEC, 2006. ITE 50.
- [59] Strawberry World - Clima de Lisboa. s.d. <http://www.strawberry-world.com/pt/portugal/lisboa/clima.html> (acedido em Fevereiro de 2012).
- [60] STRADA, M., A. CARBONARI, F. PERON, L. PORCIANI, e P. ROMAGNONI. - *The microclimate analysis of tezzone '105' of the Arsenale*. Journal of Cultural Heritage, vol. 3, Jan-Mar 2002: 89-92.
- [61] STURARO, G. et al. - *Multidisciplinary environmental monitoring at the Kunsthistorisches Museum, Viena*. Journal of Trace and Microprobe Techniques, vol. 21, 2003: 273-294.
- [62] *User Manual for DL2e Data Logger Getting Started*. Delta-T Devices Ltd, 2001.
- [63] *User Manual for DL2e Data Logger Hardware Reference*. Delta-T Devices Ltd, 2000.
- [64] *User Manual for Hygrolog HL-NT*. Rotronic, s.d.
- [65] *User Manuel for the RH and Air Temperature Sensors*. Delta-t Devices Ltd, 2000.
- [66] VUERICH, E. et al. - *Indoor measurements of microclimate variables and ozone in the church of San Vincenzo (Monastery of Bassano Romano - Italy): A pilot study*. Microchemical Journal, vol. 88, Abr 2008: 218-223.
- [67] Thermocouples and Thermocouple Applications - Delta T. s.d. <http://www.deltat.com/thermocouple.html> (acedido em Março de 2012).